



UNIVERSITY OF HELSINKI  
FACULTY OF AGRICULTURE AND FORESTRY

# HAKKUUKONETIEDON HYÖDYNTÄMINEN KUVIORAJAUKSESSA JA AJOURATUNNUSTEN LASKENNASSA

Mikko Hakala  
Maisterintutkielma  
Helsingin yliopisto  
Metsätieteiden maisteriohjelma  
Metsien ekologia ja käyttö  
Maaliskuu 2021

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Met- Metsien ekologia ja käyttö	
Tekijä – Författare – Author Mikko Hakala			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Hakkuukonetiedon hyödyntäminen kuviorajauksessa ja ajouratunnusten laskennassa			
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Metsäteknologia ja logistiikka			
Työn laji – Arbetets art – Level Maisterintutkielma		Aika – Datum – Month and year Maaliskuu 2021	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 78 s. + 3 liitesivua
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Metsävaratiedon ajantasaisuus palvelee koko metsäalaa metsänomistajasta raakapuun ostajaan. Valtakunnan metsien inventoinnin sekä Suomen metsäkeskuksen kaukokartoitusaineiston ja maastokoealojen avulla kerätty metsävaratieto Suomen metsävaroista edesauttaa metsänhoidon laajamittaista strategista suunnittelua ja luo pohjan tilakohtaisten metsäsuunnitelmien laadinnalle ja metsävaratietojen ajantasaistukselle. Metsävaratiedon ylläpito ja kuviotason operatiivinen suunnittelu vaativat kuitenkin ajantasaista tietoa myös metsässä tehdystä toimenpiteistä. Tähän Metsäkeskuksella on ollut tarve kehittää uusia työkaluja. Tavoitteena on, että vuosittain tehdyt metsänhoitotoimenpiteet ja hakkuut siirtyisivät mahdollisimman nopeasti ajantasaisena metsävaratietona eri toimijoiden käyttöön.</p> <p>Tämän työn päätavoitteena oli validoida Metsäteho Oy:n kehittämää menetelmää, jossa metsäkuviolle muodostetaan automaattinen kuviorajaus hakkuukonetiedon pohjalta (Melkas ym. 2020). Runkokohtaiseen hakkuukoneen sijaintitietoon perustuva kuviorajaus mahdollistaisi jatkuvan metsävaratiedon päivittämisen hakkuuiden yhteydessä. Kuviorajaus on tärkeä muuttuja, koska kuvion pinta-alaa käytetään suoraan kertomana arvioitaessa kuviokohtaisia puustotunnuksia ja hakkuukertymiä (Belbo &amp; Talbot 2020).</p> <p>Tutkimuksen hakkuukonetieto oli kerätty 12/2017–06/2018 ja kattoi noin 3 000 korjuulohkoa ja 5 316 214 sijaintipistettä Manner-Suomessa. Hakkuukonetiedosta saatavaa runkokohtaista sijaintitietoa voidaan käyttää automaattisessa kuviorajauksessa. Tutkimuksessa korjuulohkojen sijaintitiedot luokiteltiin kuviioihin ja siirtymäuriin. Yksittäisen kuvion sijaintitiedot yhdistettiin kolmioimalla verkostoksi, minkä jälkeen muodostuneelle polygonille asetettiin puskurivyöhyke tasaamaan GNSS-paikannuksessa tapahtuvaa virhettä ja kuvastamaan samalla hakkuukoneen puomin ulottuvuutta. Hakkuukoneen sijaintitietojen avulla kuviolle voitiin muodostaa automaattisesti myös ajouraverkosto, josta pystyttiin laskemaan kuviokohtaisia ajouratunnuksia.</p> <p>Automaattinen kuviointi tuotti ilmakuvareferensseihin verrattuna luotettavat kuviorajaukset kolmella yleisimmällä hakkuutavalla, kun kuvion pinta-ala oli vähintään 0,75 ha. Hakkuukonekuvio oli keskimäärin kolme prosenttia suurempi kuin ilmakuvasta käsin digitoitu verrokkina toiminut referenssikuvio. Hakkuukonekuvioiden pinta-alojen suhdelluvut referenssikuviioihin nähden olivat ensiharvennuksilla 1,044, harvennuksilla 1,020, avohakkuilla 1,034 ja kaikki hakkuutavat huomioiden 1,031. Eri hakkuutapojen välillä vaihtelu oli pientä, ja hakkuukonekuvion pinta-alavastavuus parani isompia kuvioita kohti. Yli 1,5 hehtaarin kuviolla pinta-alojen suhteellinen ero oli keskimäärin enää yhden prosentin luokkaa.</p> <p>Tutkimuksen toinen tavoite oli automaattisen ajouralaskennan validointi. Sijaintipisteiden pohjalta kuviolle luotiin ajouraverkosto, jossa hakkuukoneen edestakaiset liikkeet jätettiin huomiotta. Automaattisesta ajouraverkostosta laskettiin keskimääräiset ajouravälit (m) ja uratiheys (m/ha) kuviokohtaisesti sekä kattavasti koko kuviolta että jäljittelemällä Suomen metsäkeskuksen maastokoealamittausta korjuujäljen laadun arvioinnissa. Laskenta tuotti ajouratunnukset, jotka olivat realistisia verrattaessa hyvän metsänhoidon suosituksiin. Ajouravälit olivat harvennuksilla keskimäärin 20,7 metriä ja avohakkuilla 17,1 metriä.</p> <p>Koko työn yhteenvedon voidaan todeta, että automaattinen kuviorajaus vastasi referenssikuviota niin pinta-alaltaan kuin sijainniltaan varsin luotettavasti ja on tuotavissa osaksi luotettavaa ajantasaista metsävaratietoa. Ajouratunnusten laskenta antoi tuloksia, joiden avulla voidaan todentaa ajouraverkostolle asetettujen suositusten toteutumista.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords ajouralaskenta, automaattinen kuviorajaus, hakkuukonetieto, hakkuukonekuvio, referenssikuvio			
Ohjaaja tai ohjaajat –Handledare – Supervisor or supervisors Heikki Ovaskainen, Kirsi Rieki, Timo Melkas, Veli-Pekka Kivinen			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Department of Forest Sciences		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Forest Ecology and Management
Tekijä – Författare – Author Mikko Hakala		
Työn nimi – Arbetets titel – Title Utilizing of Harvester Data on Stand Delineation and Strip Road Calculation		
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Forest Technology and Logistics		
Työn laji – Arbetets art – Level Master's Thesis	Aika – Datum – Month and year March 2021	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 78 p. + 3 appendices.
<p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Up-to-date forest inventory benefits the entire forest industry, all the way from forest owners to buyers of raw wood. The forest inventory gathered through remote sensing data and field sample plots by both National Forest Inventory (NFI) and Finnish Forest Centre supports large-scale strategic planning of forestry management and creates a foundation for forest planning as well as up-to-date forest inventory. Operative planning and up-to-date forest inventory also require information about recent cuttings. Finnish Forest Centre has deemed it necessary to develop tools to monitor the realized cuttings on an annual basis. The aim is that data from annual forest operations and cuttings could be transferred into updated forest inventory as soon as possible.</p> <p>The main focus of this thesis was on a method developed by Metsäteho Oy, whereby a stand delineation is automatically created for each forest stand based on harvester data (Melkas ym. 2020). Stand delineation carried out on the basis of stem-specific harvester location data would enable to constantly update the forest inventory in conjunction with logging operations. Stand delineation is an important information because stand area is routinely used as a coefficient in the estimation of stand-specific logging accumulation (Belbo &amp; Talbot 2020).</p> <p>The harvester data was gathered between December 2017 and June 2018 and comprised approximately 3,000 harvested objects and 5,316,214 locations all over continental Finland. The stem-specific location data recorded by harvester is used in automated stand delineation. Using triangulation, the location data of the stands was combined into a network, and a buffer zone was created for the resulting polygon to reduce the contribution of errors in GNSS navigation while also reflecting the reach of the harvester boom. The use of harvester location data also made it possible to automatically create a strip road network, which in turn allowed to calculate stand-specific strip road variables.</p> <p>Compared to aerial photography references, automated delineation yielded reliable stand delineations when carried out with three most common logging methods and when the stand area was at least .75 hectares. The automated stand was on average three per cent larger than the reference stand manually created from digital aerial photographs. Compared to reference stands, the relative areas of the automated stands were as follows: 1.044 for the first thinning; 1.020 for later thinnings; 1.034 for clear cutting; and 1.031 for all of these harvesting methods combined. There was little variation between the various harvesting methods, and the correlation between automated stand areas and references increased with the size of the stand. For stands with an area more than 1.5 hectares the relative difference in areas was, on average, only around one per cent.</p> <p>Another aim was the validation of automated strip road calculation. On the basis of harvester locations, a strip road network was created, where the to-and-fro movement of the harvester was ignored. Next, the automatically created strip road network was used to calculate the average spacings between strip roads (in metres) and strip road density (in metres/hectare). This was done comprehensively for each stand. In addition, the strip road variables were calculated by emulating sample plot measurements carried out by the Finnish Forest Centre in the evaluation of the quality of harvesting sites objects. Both results were realistic when compared to best practices in forest management. On average, the spacing between strip roads in thinning areas was 20.7 metres and 17.1 metres in clear cuttings.</p> <p>To sum up, there was a reliable correlation between automated stand delineation and reference stands both in terms of area and location; thus, it would be viable to integrate the automatically delineated stands as part of reliable and up-to-date forest inventory. The results of strip road calculation are applicable to validate the implementation of the recommendations set for strip road networks.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords strip road calculation, automated stand delineation, harvester data		
Ohjaaja tai ohjaajat –Handledare – Supervisor or supervisors Heikki Ovaskainen, Kirsi Riekk, Timo Melkas, Veli-Pekka Kivinen		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information		

## **Alkusanat**

Haluan kiittää Metsäteho Oy:n Heikki Ovaskaista, Kirsi Riekkiä ja Timo Melkasta graduni ohjaamisesta. Suuret kiitokset tilaisuudesta saada tehdä tutkimusta kanssanne ja kaikista ohjeista, jotka tätä työtä ovat muovanneet. Kiitos Veli-Pekka Kiviselle Helsingin yliopistolta neuvoista ja kannustuksesta. Kiitos myös Lasse Vuorelle avusta englannin kielen kanssa.

Lopuksi kiitos puolisolleni Riitalle tuestasi ja korvaamattomasta panoksestasi, joka mahdollisti metsätieteiden opintoni.

# SISÄLLYS

KÄSITTEET.....	7
1 JOHDANTO.....	8
1.1 Taustaa .....	8
1.2 StanForD-standardi ja hakkuukoneen tallentamat tiedot.....	14
1.3 Kuvionmuodostus .....	16
1.3.1 Metsätehon kuviointialgoritmi .....	16
1.3.2 Delaunay-kolmiointi laskennallisessa kuvionmuodostuksessa .....	20
1.3.3 Muita hakkuukonetietoihin perustuvia kuviointimenetelmiä .....	22
1.4 Ajouralaskenta ja ajouraverkoston muodostaminen automaattisesti .....	24
1.5 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset .....	25
2 AINEISTO JA MENETELMÄT.....	26
2.1 Aineiston esittely .....	26
2.2 Hakkuukonekuvioiden vertailu referenssikuvioihin.....	28
2.3 Ajouralaskenta .....	34
3 TULOKSET .....	38
3.1 Kuvioiden vertailu .....	38
3.1.1 Kuvioiden pinta-alan osuvuus.....	40
3.1.2 Kuvioiden sijainnin osuvuus .....	44
3.1.3 Kuvioiden osuvuus maisemamaakunnittain .....	45
3.2 Ajourat .....	46
3.2.1 Keskimääräiset ajouravälit ja uratiheydet.....	46
3.2.2 Maastomittausta simuloimalla lasketut uravälit.....	51
4 TARKASTELU .....	53
4.1 Kuvioiden vertailu .....	53
4.1.1 Kuvioiden pinta-alan osuvuus.....	54
4.1.2 Kuvioiden sijainnin osuvuus .....	57
4.1.3 Virhelähteitä referenssikuvioiden digitoinnissa.....	64

4.2 Ajourat .....	65
4.2.1 Laskennalliset ajouratunnukset.....	65
4.2.2 Ajouravälilaskennan simulointi .....	69
5 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	70
5.1 Automaattinen kuviointi .....	70
5.2 Ajourat .....	73
LÄHTEET .....	75
LIITTEET .....	79

# KÄSITTEET

Tässä tutkimuksessa käytetään seuraavia käsitteitä:

GNSS:	Global Navigation Satellite System eli satelliittipaikannusjärjestelmä. Yleisimmin satelliittipaikannusjärjestelmä käsittää noin 30 Maata kiertävää satelliittia.
Hakkuukonekuvio:	Hakkuukoneen sijaintitiedoista automaattisesti tuotettu aluerajaus, jolle hakkuutoimenpide on kohdistunut.
Hakkuukonetieto:	Hakkuukoneen automaattisesti keräämää tietoa, joka sisältää runkokohtaisen tiedon puulajista, valmistettujen puutavarapölkkyjen läpimitoista sekä tiedon koneen sijainnista runkoa käsiteltäessä.
Ilmakuva:	Lentokoneesta tai muusta lentävästä laitteesta ylhäältä päin otettu kuva maastosta. Tämän tutkimuksen ilmakuvat ovat ortoilmakuvia.
Kuvio:	Kasvupaikaltaan, puulajistoltaan ja toimenpidetarpeiltaan suhteellisen yhtenäinen metsän osa.
Leimikko:	Nauhalla maastoon merkitty hakattavaksi suunniteltu puunkorjuu-ala. Voi koostua yhdestä tai useammasta kuviosta.
Lohko:	Leimikon osa, joka voidaan korjata samalla korjuumenetelmällä samana ajankohtana samalle varastolle.
Pisteparvi:	Hakkuukoneen yksittäisistä sijaintitiedoista koostuva lohko- tai kuviokohtainen joukko pisteitä, joiden perusteella hakkuukonekuvio ja ajouraverkosto voidaan muodostaa.
Polygoni:	Kulmapisteiden joukolla määritetty kaksiulotteinen monikulmio.
Referenssikuvio:	Oikeana pidettävä kuviorajaus, johon hakkuukonekuviota verrataan. Tämän työn referenssikuviot on digitoitu käsin ilmakuvalta.
Siirtymäura:	Hakkuukoneen ura, jota pitkin kone siirtyy toiselle korjuulohkolle ja/tai tienvarsivarastolle. Ei kuulu toimenpidekuvioon.
Toimenpidekuvio:	Aluerajaus, jolle metsänkäsittelytoimenpide on kohdistunut.
Uratiheys:	Uraverkoston pituus kuviolla hehtaaria kohti (m/ha).

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Taustaa

Ajantasainen metsävaratieto hyödyttää sekä metsäteollisuutta että metsänomistajaa mahdollistamalla ajantasaisemman metsäsuunnittelun ja auttamalla tekemään oikea-aikaisia hakkuita ja metsänhoitotoimenpiteitä. Näin metsänomistaja saa paremman tuoton sijoitukselleen ja korjuun ohjaus voi suunnitella hakkuut siten, että se pystyy toimittamaan käyttöpaikkojen tarvitsemia puutavaralajeja oikea-aikaisesti (Holopainen ym. 2015). Metsävaratiedon ajantasaistamisen haasteena ovat hakkuutietojen osalta metsänkäyttöilmoitusten perusteella saadun tiedon riittämättömyys ja epätarkkuus sekä kustannuksiin korkeat maastomittaukset.

Suomessa metsävaratietoa on tähän asti päivitetty kahdella eri tavalla: Valtakunnan metsien inventointi (VMI) tuottaa tilastotietoa metsävaroista ja niiden kehittymisestä maastokoealojen ja satelliittikuvien perusteella. VMI:ssa maastokoealoja mitataan vuoden aikana reilu 10 000 ja koealoja mittaamalla saatu paikallinen metsävaratieto yleistetään satelliittikuvien avulla koko maan kattavaksi paikkatiedoksi. Suomen metsäkeskus (Metsäkeskus) puolestaan tuottaa metsävaratietoa, joka perustuu laserkeilaukseen, ilmakuvaukseen sekä maastossa mitattuihin kuviokohtaisiin koealoihin (Kangas ym. 2019). Metsäkeskus kerää ja ylläpitää päivitettyä metsävaratietoa Suomen yksityismetsistä. Ajantasainen tieto auttaa metsänomistajia ja metsänhoidon ammattilaisia suunnittelemaan metsäoperaatioita, ja metsävaratiedon avulla päivitetään muun muassa Metsään.fi-palvelua, joka on metsänomistajille ja metsäalan toimijoille maksuton asiointipalvelu.

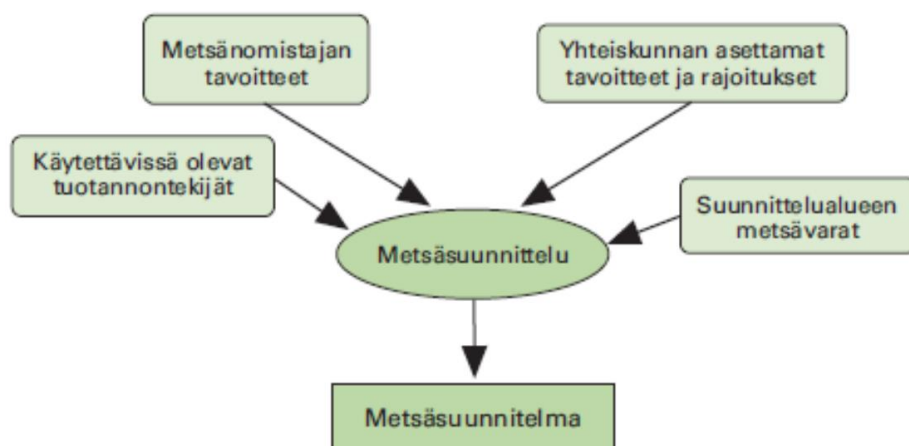
Metsäkeskus on inventoinut metsävaratietoja laserkeilausta ja maastokoealoja hyödyntäen vuodesta 2010 lähtien. Vuosittain inventoidaan noin 1,5 milj. hehtaaria yksityismetsiä (Metsäkeskus 2016), mikä vastaa noin 10 %:a Suomen yksityismetsien pinta-alasta. Yksityismetsien osuus koko Suomen metsämaan pinta-alasta on Hännisen (2020) mukaan noin 60 %. Maastokoealat sijoitetaan inventoitavalle alueelle siten, että ne edustavat mahdollisimman kattavasti alueen puuston vaihtelua (Holopainen ym. 2011). Laserkeilauksesta ja ilmakuvista saatavien ilmakuvapiirteiden avulla maastossa mitattujen koealojen tiedot yleistetään koskemaan koko inventoitavaa aluetta. Lisäksi tehdään maastotarkastuksia noin kymmenesosalle metsikkökuvioita, koska pelkkä kaukokartoitus pohjainen



tieto ei ole riittävän luotettavaa (Juujärvi 2016). Vuonna 2020 alkavalla kartoituskierroksella laserkeilauksen pistetiheys tulee olemaan aiempaa suurempi, noin 5 pistettä neliömetrillä, jolloin metsistä saadaan entistä tarkempaa puustotietoa. Kartoituksen yhteydessä tuotetaan laserkeilauksen lisäksi ilmakuvauksaineistoa, ja lähes koko maan metsävarat pyritään kartoittamaan noin kuuden vuoden sykleissä (Metsäkeskus 2019).

Metsänkäyttöilmoitusten avulla pyritään päivittämään tehtyjä metsänkäsitteilytoimenpiteitä. Niiden avulla ei kuitenkaan voida pitää yllä luotettavaa, ajantasaista tietoa metsävaroista, koska ilmoituksissa ja hakkuiden toteutumisissa on eroja ja jotkin hakkuut voivat jäädä jopa kokonaan tekemättä. Metsänkäyttöilmoituksissa leimikon rajausta on epäluotettava, sillä leimikko on saattanut toteutua huomattavasti ilmoitetusta poikkeavana. Lisäksi metsänkäyttöilmoituksen voimassaoloaika on kolme vuotta, joten ei ole varmaa, milloin toimenpide metsässä on tehty tai onko sitä tehty lainkaan. Muun muassa näiden syiden vuoksi Metsäkeskuksella on tarve kehittää työkaluja, joilla voitaisiin seurata toteutuneita hakkuita vuosittain (Hakkuukonetiedon käyttö metsävaratiedon ajantasaistuksessa 2018).

Metsäsuunnittelulla pyritään saamaan metsistä paras hyöty metsänomistajan toiveiden mukaisesti. Metsäsuunnitelma tehdään metsänomistajalle päätösten apuvälineeksi sekä tulevaisuuden toimintavaihtoehtojen kartoittamiseksi (Pukkala 2007). Suunnitelman laatimista ohjaavat metsänomistajan tavoitteiden lisäksi käytettävissä olevat resurssit sekä lainsäädäntö (Kuva 1). Yksityismetsissä suunnitelman kohteena on usein metsätila, jolla on vaihteleva määrä kuvioita. Suunnitelman aikajänne vaihtelee sen mukaan, mikä on metsäsuunnitelman tavoite (Saarinen ym. 2018).



Kuva 1. Metsäsuunnitelman laatimista ohjaavat tekijät (Saarinen ym. 2018).

Tilakohtaisen suunnittelun (taktinen taso) aikajänne on tyypillisesti 5–15 vuotta. Taktisen tason suunnitelmassa huomioidaan metsänomistajan tavoitteet metsänkäytölle. Jotkut metsänomistajat panostavat metsänhoidossa taloudelliseen turvaan, toiset taas painottavat enemmän aineettomia, henkisiä hyötyjä. Kuviokohtaisessa (operatiivinen taso) suunnitelmassa määritetään lyhyen aikavälin (0,5–2 vuotta) toimenpiteet ja ratkaistaan, miten ne toteutetaan (Niskanen 2005). Metsäsuunnitelman tekemisessä hyödynnetään saatavilla olevaa avointa metsävaratietoa ja mahdollisista maastokäynneistä saatuja tarkentavia havaintoja. Suomessa yksityismetsät on tarkkaan inventoitu ja niistä on olemassa laserkeilausaineisto, joka hyödyntää GNSS-pohjaista paikkatietojärjestelmää.

Paikkatietojärjestelmiä on hyödynnetty metsätaloudessa jo pitkään, ja nykyään järjestelmien avulla voidaan kartoittaa operatiivista toimintaa varten laajoja alueita. Holopaisen ym. (2015) mukaan ”paikkatietojärjestelmä on tietokonepohjainen järjestelmä, jolla voidaan tallentaa, hakea, käsitellä, ylläpitää, analysoida ja tulostaa paikkatietoa”. Parhaana esimerkkinä Suomessa on VMI, jossa koko maan metsävarat inventoidaan tasaisin välein strategista suunnittelua silmällä pitäen (Holopainen ym. 2015). Viimeisin, VMI12, tehtiin vuosina 2014–2018. Luonnonvarakeskuksen (Luke) tilastojen perusteella Suomen metsävarat ovat edelleen kasvussa (vuosikasvu noin 108 milj. m<sup>3</sup>) ja koko maan puuston tilavuus on 2 475 milj. m<sup>3</sup> (Luonnonvarakeskus 2019).

VMI:n avulla tehdään suuren mittakaavan strategista metsäsuunnittelua, joka ei sellaiseenaan sovellu kuvio- tai metsikkötason operatiiviseen suunnitteluun. Operatiivisen metsäsuunnittelun tavoitteena on Holopaisen ym. (2015) mukaan kartoittaa mahdolliset metsänkäsittelytoimenpiteet sekä arvioida hakkuumahdollisuudet ja hakkuukertymä. Operatiivista suunnittelua varten leimikoista on oltava saatavilla ajantasaista metsävaratietoa, aina yksityiskohtaisempia puutavaralajien määrää ja runkojen laatua myöten (Holopainen ym. 2015). Puustotietojen sekä kasvupaikkaluokituksen avulla muodostetun puuntuotokyvyn pohjalta metsänomistajalle luodaan päätöksenteon tueksi metsäsuunnitelma, joka tehdään pääosin Metsäkeskuksen tuottamaa kuviokohtaista metsävaratietoa hyödyntäen ja jota täydennetään tarvittaessa maastokäynneillä.

Kuvioittainen arviointi on metsätalouden järjestelymenetelmä, jossa metsän pinta-ala jaetaan kartalla metsän käytön kannalta tarkoituksenmukaisiin osiin. Menetelmä otettiin Suomessa käyttöön jo 1900-luvun alussa Metsähallituksen suosituksesta (Poso 1983).

Alkuun kuviokartoitus oli käytössä lähinnä valtion metsissä, ja yksityismetsissä menetelmä yleistyi voimakkaasti 1970-luvulla. Tuomisen ja Pekkarisen (2007) mukaan jo vuonna 2001 kuvioittaisen arvioinnin pohjalta tehdyt metsäsuunnitelmat kattoivat Suomen yksityismetsien pinta-alasta 67 %.

Pääosin kaukokartoituksen pohjalta tehty metsäkuvio on yhä metsätalouden perusyksikkö, jonka koko riippuu metsän ominaisuuksista (Antinluoma ym. 2019). Metsäkuviot rajaavat sisäänsä suhteellisen homogeenisen metsäosan, jolla on yhtenäinen toimenpidetarve (Poso 1994, Antinluoma ym. 2019). Tämä jakaa metsikön luonnollisiin kuvioihin, joissa puusto ja hakkuutapa muodostavat yhtenäisen kokonaisuuden.

Kuvioiden muodostaminen on perinteisesti tehty metsäsuunnittelijan toimesta käyttäen apuna kaukokartoitusaineistoja (Niemi ym. 2020). Nykyisin kuviot muodostetaan yhä useammin automaattisin menetelmin, jotka perustuvat esimerkiksi laserkeilauksesta saataviin latvusmalleihin (Canopy Height Model, CHM) ja väärävärikuvia hyödyntäviin ilmakuviin (Mustonen ym. 2008, Heikkilä 2017). CHM-malleista saatavat puustotunnukset – etenkin puiden pituus – ovat luotettavia, mutta kuvioinnin ongelma on puulajin tunnistus. Ilmakuvista puolestaan on helpompi tunnistaa puulajit. Eri aineistoista tietoja yhdistämällä saadaan tarkka kuva metsän puustosta ja puuntuotoskyvystä. Kuviokohtaisen pinta-alan tarkkuus on tärkeä muuttuja, koska pinta-alaa käytetään suoraan kertoimena laskettaessa kuviokohtaisia puustotunnuksia ja hakkuukertymiä (Belbo & Talbot 2020).

Ilmakuvilta on helppo havaita automaattisilla menetelmillä myös puustossa tapahtuneet voimakkaat muutokset ja selvät kuviorajat (Hyppänen 1999, Sell 2002). Kuviorajauksen tekeminen ilmakuvilta manuaalisesti on silti usein subjektiivista työtä, ja vierekkäisten eri hakkuiden rajat saattavat vaikeuttaa kuviorajojen hahmottamista (Hyppänen ym. 1996). Lisäksi päätehakkuiden muutos ja niiden rajaaminen on helpompi havaita kuin harvennusten tai muiden toimenpiteiden (Hyppänen 1999). Kuviorajojen hahmottaminen visuaalisesti ilmakuvilta on kuitenkin Sellin (2002) mukaan osoittautunut automaattisia menetelmiä tarkemmaksi, joskin hitaammaksi. Näistä syistä automaattisesti kaukokartoitusaineistoista muodostettuja kuvioita joudutaan tarkentamaan mahdollisesti manuaalisesti metsäsuunnitelman laadinnan yhteydessä.

Metsäkuviot tallennetaan vektorimuotoisiksi polygoneiksi, joka on yksinkertainen esitystapa ja vie vähän tallennustilaa. Vektorimuotoisen esitystavan ongelmana on, että sen avulla ei voida kuvata alueen sisäistä vaihtelua, vaan yksi vektorien rajaama polygoni saa vain yhden ominaisuustiedon arvon (Holopainen ym. 2015).

Kuvioittaisen arvioinnin lisäksi metsiä voidaan tarkastella puustohilan avulla. Esimerkiksi Metsäkeskus on tuottanut hilamuotoista avointa metsävaratietoa vuodesta 2010. Puustohilassa metsä on jaettu ruudukkoon, jonka ruutukoko on yleensä 16 x 16 metriä. Kukin ruutu sisältää alan puustotunnukset ja kasvupaikkatietoa. Ruudun puustotunnukset ja lajitiedot yleistetään koko ruutua koskevaksi, mutta on silti huomattavasti tarkempaa kuin kuviokohtainen tieto, jossa yleistys tehdään koko kuviolle (SMK 2020). Puustohilalta näkyy tarkemmin, miten esimerkiksi puulajit ovat jakautuneet alueella ja miten puuston tilavuus vaihtelee alueen sisällä. Suurille metsäalan toimijoille hilapohjainen metsävaratieto on hyvä apuväline sen pienipiirteisyyden vuoksi, mutta kuviokohtainen tieto soveltuu paremmin yleiseen käyttöön metsänomistajien ja pienempien toimijoiden keskuudessa (Antinluoma ym. 2019). Käytännön operatiivisessa toiminnassa toimenpidekuvio sekä toimenpide-ehdotukset muodostetaan usein kuviokohtaisen metsävaratiedon perusteella.

Suomessa yksityismetsien inventoinnissa ollaan siirtymässä ajantasaisen, jatkuvasti päivittyvän metsävaratiedon käyttöön, mikä eroaa perinteisestä kymmenen vuoden välein tehtävästä suunnitteluinventoinnista (Holopainen ym. 2013, Antinluoma ym. 2019). Hakkuukonetiedon pohjalta tehtävä automaattinen kuvionmuodostus yhdistettynä laserkeilauksesta saatavaan tietoon mahdollistaisi ajantasaisen metsävaratiedon niillä alueilla, joilla hakkuukone on työskennellyt. Automaattinen kuviorajaus auttaisi päivittämään metsävaratietoa jatkuvasti.

Maa- ja metsätalousministeriössä toteutettiin vuosina 2016–2018 *Metsätieto ja sähköiset palvelut* -kärkihanke, johon merkittävänä osana kuului lisätä menetelmiä ajantasaisen metsävaratiedon ylläpitämiseksi muun muassa hakkuukonetietoa hyödyntämällä. Tavoitteena oli tehostaa metsävaratiedon avoimuutta sekä parantaa tiedon laatua ja liikkuvuutta eri toimijoiden välillä (Hakkuukonetiedon käyttö metsävaratiedon ajantasaistamisessa 2018). Hankkeessa kehitettyjen menetelmien tarkoituksena on tuottaa tulevaisuudessa ajantasaisia kuviorajauksia toteutetuista hakkuista Metsäkeskuksen ylläpitämiin

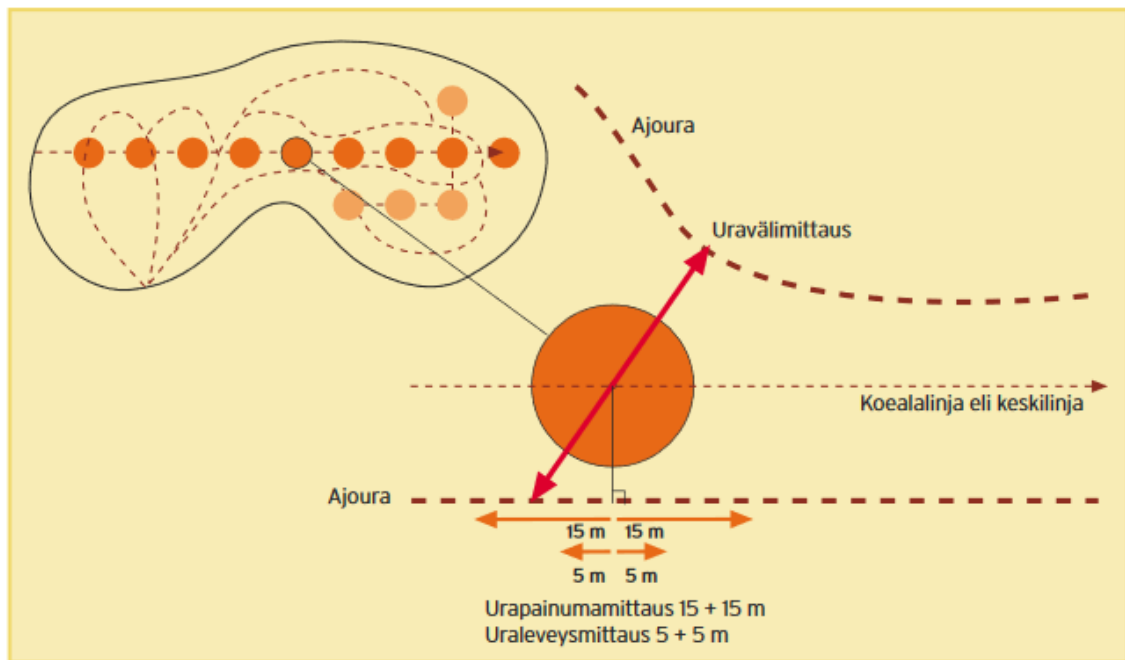
metsävaratietoihin. Tavoitteena on saada menetelmät osaksi metsäsektorin operatiivista toimintaa (Räsänen ym. 2019).

Automaattista hakkuukonetiedon keruuta on kehitetty korjuujäljen laadun mittaamiseen ja vähentämään hidasta käsin tapahtuvaa mittausta maastossa. Samalla automaattinen tiedonkeruu mahdollistaa myös kattavamman korjuujäljen tarkastelun. Hakkuukonetyön laadun reaaliaikaista mittaustietoa voitaisiin hyödyntää hakkuutyön suoritusta arvioitaessa joko työn aikana tai jälkikäteen. Toinen keskeinen käyttökohde automaattisella puunkorjuun laatutiedon keruujärjestelmällä olisi kehittää metsävaratiedon automaattiseen päivittämiseen käytettäviä menetelmiä ja liittää ne osaksi Metsäkeskuksen toteumatietoja (Ovaskainen 2019).

Puunkorjuun suunnittelulla voidaan vähentää ajouria. Suurin osa talousmetsässä puihin syntyvistä vaurioista aiheutuu nimenomaan korjuuvaiheessa: jätettäviin runkoihin tulee runkovaurioita korjattavien puiden ja koneen eri osien osuessa niihin, ja juurivaurioita voi syntyä etenkin metsäkuljetusvaiheessa (Metsäteho 2003). Erityisesti kuormatraktorit voivat aiheuttaa pehmeään maahan painaumuksia ajaessaan täydellä kuormalla.

Tästä syystä on tärkeää, että ajourat olisi mitoitettu mahdollisimman optimaalisesti. Tällöin niiden pinta-ala kuvioon nähden pienenee ja maastoon syntyisi mahdollisimman vähän ajourapainauksia. Lisäksi pienempi ajouraverkosto peittäisi vähemmän puuntuotantoon kuuluvaa metsäpinta-alaa. Hyvän metsänhoidon suositusten mukainen ajouraväli on kivennäismaiden kasvatushakkuilla vähintään 20 metriä (Äijälä ym. 2019). Avohakkuille ajouravälisuosituksia ei ole.

Korjuujäljen laadun arvioinnissa nykyisin käytettävä ajouravälimittaus toteutetaan pitkälti systemaattisena maastokoealaotantana. Kuviolle mitataan tasaisin välimatkoin ympyräkoealat, joiden keskipisteiden kautta kulkevilta janoilta mitataan ja lasketaan keskimääräinen ajouraväli kuviolle (Kuva 2). Ympyräkoealaotannan vaatimuksena on vähintään 1 hehtaarin kuviokokoo ja kuvion muoto, joka mahdollistaa normaalin ajouraverkoston. Maastokoealamittaus ja sen koealojen valinta on osittain subjektiivista, joten myös niistä saatavat tulokset ovat jossain määrin tekijästä riippuvaisia. Näin ollen saadut tulokset voivat olla vääristyneitä eikä ole takeita, että koealat edustaisivat kattavasti koko ajourastoa.



Kuva 2. Ajouravälin määrittäminen systemaattisella ympyräkoelaotannalla (Leivo ym. 2020). Menetelmällä ei mitata kahden vierekkäisen ajouran lähintä kohtisuoraa etäisyyttä, vaan lyhin välimatka, joka kulkee ympyräkoetalan keskipisteen läpi.

## 1.2 StanForD-standardi ja hakkuukoneen tallentamat tiedot

Hakkuukonetiedon sujuvaa jakamista ja käyttöä varten tarvitaan standardi. Sellaista on ollut kehittämässä ruotsalainen Skogforsk yhdessä Metsäteho Oy:n (Metsäteho) ja eri konevalmistajien kanssa. Kehitystyön tuloksena on syntynyt nykyinen XML-pohjainen StanForD2010-metsäkonestandardi, joka parantaa kerätyn tiedon yhteensopivuutta ja vertailtavuutta eri tietojärjestelmien ja sovellusten välillä (Skogforsk 2020).

StanForD (Standard for Forest machine Data and Communication) on tiedonsiirtostandardi, jonka ensimmäinen versio kehiteltiin jo 1980-luvun lopulla ruotsalaisen Skogforskin aloitteesta. Standardi laadittiin, koska metsäalalla tarvittiin hakkuukonetiedon laajempaan hyödyntämiseen yhtenäinen tiedonsiirtojärjestelmä eri metsäkoneiden ja metsäteollisuuden puunhankinnan tietojärjestelmien välille. Suomalaiset liittyivät standardin käyttäjiksi muutamia vuosia myöhemmin 1990-luvun alussa Metsätehon tultua mukaan hankkeeseen. Nykyisenkaltaisen standardi luotiin vuosituhannen lopulla, kun suuret laitevalmistajat lähtivät rahoittamaan kehitystyötä. Standardin nykyisen version, StanForD2010:n, kehitys alkoi vuonna 2008 yhteistyössä Skogforskin ja Metsätehon kanssa.

Standardia päivitetään vuosittain, ja viimeisin päivitys, versio 3.6, julkaistiin helmikuussa 2020.

Nykyään StanForD-standardia noudattavat hakkuukoneet voivat määrittää oman sijaintinsa hakkuilla verrattain tarkasti. Paikannuslaite sijaitsee yleensä hakkuukoneen hytin katolla, ja hakkuukoneen sijainti tallennetaan rungon kaadon yhteydessä (Skogforsk 2020). Sijainnin lisäksi hakkuukonetietoon tallennetaan runkokohtaisesti puulaji, rungon läpimitat 10 cm:n välein, tehtyjen puutavarapölkkyjen dimensiot sekä rungon käyttöosan pituus, joiden avulla voidaan laskea poistuman puu- ja puustotunnukset.

Hakkuukoneen sijaintitietoa kerätään käyttäen GNSS-satelliittipaikannusjärjestelmää StanForD-standardin mukaisesti. Yleisimpiä käytössä olevia satelliittipaikannusjärjestelmiä ovat Nasan ylläpitämä GPS, eurooppalainen Galileo ja venäläinen GLONASS. Tavallisesti järjestelmä käsittää noin 30 Maata kiertävää satelliittia, joiden sijainti tunnetaan niiden kiertoradan ja nopeuden perusteella (Holopainen ym. 2015). Satelliitit kiertävät maapalloa siten, että jokaisella ajanhetkellä paikannuslaitteella on löydettävissä 4–8 satelliittia. Parhaat paikannusjärjestelmät pystyvät seuraamaan samanaikaisesti usean järjestelmän satelliitteja tarkemman paikannuksen laskemiseksi. Paikannukseen tarvitaan vähintään kolme satelliittia, joiden etäisyys vastaanottimesta tunnetaan, sekä neljäs satelliitti ratkaisemaan vastaanottimen kellovirheen (Poutanen 2016). Hakkuukoneissa olevat vastaanottimet ja niiden tarkkuus vaihtelevat konemerkeittäin.

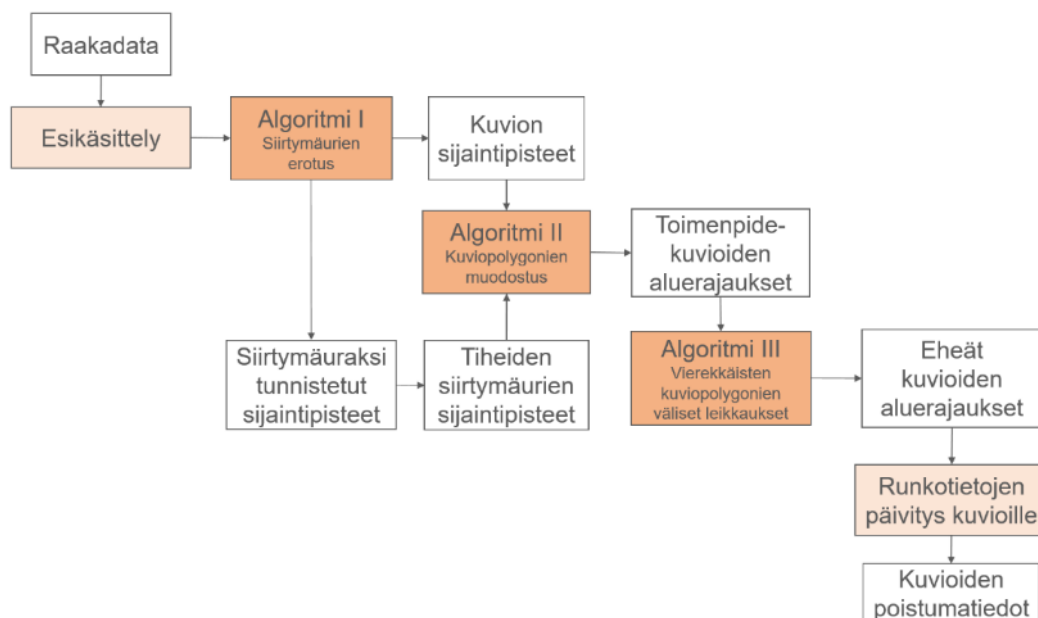
Hakkuukoneen GNSS-paikannukseen vaikuttavat muun muassa maastonmuodot – esimerkiksi jyrkkien rinteiden tai korkeiden mäkien rinteillä ja niiden juurella hakkuukoneen tallentama sijaintitieto saattaa erota huomattavasti sen todellisesta sijainnista. Tämä johtuu siitä, että satelliitin signaali ei pysty läpäisemään kiinteitä esteitä (Poutanen 2016). Näissä tapauksissa ero voi hyvinkin olla lähes 10 metrin luokkaa, kun tavanomainen ero on hakkuukoneella muutama metri, ja erillisillä tarkkuuspaikantimilla päästään jopa alle metrin tarkkuustasoon. Myös hakkuutavalla on merkitystä paikannustarkkuuteen: harvennushakkuissa paikannus jää usein avohakkuista epätarkemmaksi, koska jätettävä puusto luo katvetta satelliitteihin. (Poutanen 2016, Ovaskainen ym. 2019, Melkas ym. 2020).

## 1.3 Kuvionmuodostus

### 1.3.1 Metsätehon kuviointialgoritmi

Metsäteho on kehittänyt metsävaratiedon ajantasaistukseen uutta menetelmää, jonka avulla toimenpidekuvion rajausta ja kuvion ajourat voidaan luoda automaattisesti hakkuukonetiedon pohjalta (Räsänen ym. 2019). Hakkuukoneiden mittalaitteet keräävät kaadetusta puustosta valtavan määrän tietoa, josta voidaan edelleen muodostaa puustokohtaista metsävaratietoa Laasasenahon (1982) runkokäyrälaskentaa hyödyntäen.

Metsätehon kehittämä automaattinen kuviointimenetelmä käyttää kuvionmuodostukseen kolmea algoritmia (Kuva 3). Ensimmäinen algoritmi keskiarvoistaa hakkuukoneen sijaintitiedot ja pyrkii erottamaan kuviolla olevat koneen sijaintipisteet siirtymäurista. Keskiarvoituksessa käytetään runkojen sijainteja kaatojärjestyksen asemesta ja huomioidaan GNSS-paikannuksen tarkkuus. Toinen algoritmi muodostaa alueelle rajauksen käyttäen Delaunay-kolmiointia, ja kuvioraja puskuroidaan käyttäen tiettyjä parametreja, jotka kuvaavat esimerkiksi hakkuukoneen puomin ulottumaa. Kolmas algoritmi tunnistaa vierekkäiset, toistensa päälle menevät kuviorajat ja siistii rajaukset (Melkas ym. 2020).



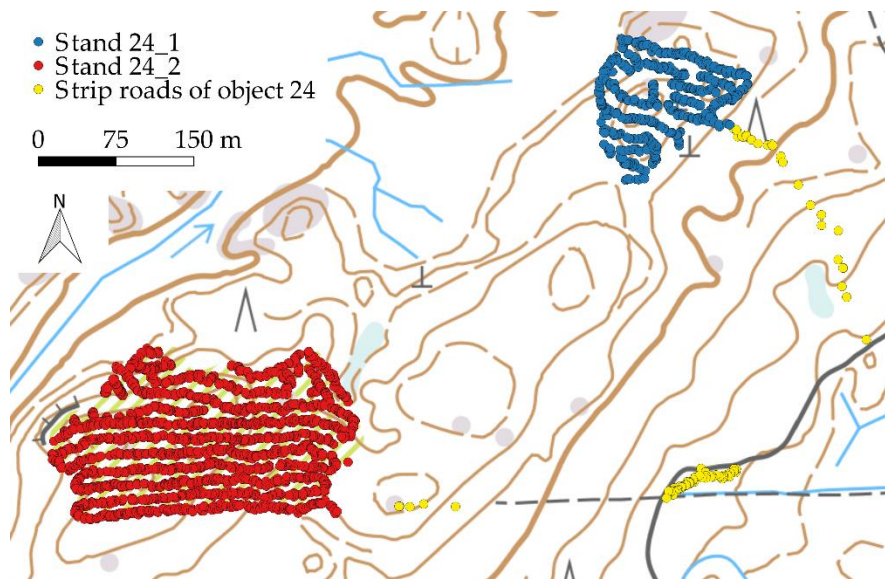
Kuva 3. Automaattisen kuvioinnin prosessikaavio (Melkas ym. 2020).

Automaattinen kuviointi edellyttää, että yhdellä loholla on käytetty vain yhtä hakkuutapaa (Melkas ym. 2018). Lohkojako tehdään yleensä puukaupan perusteella kolmeen



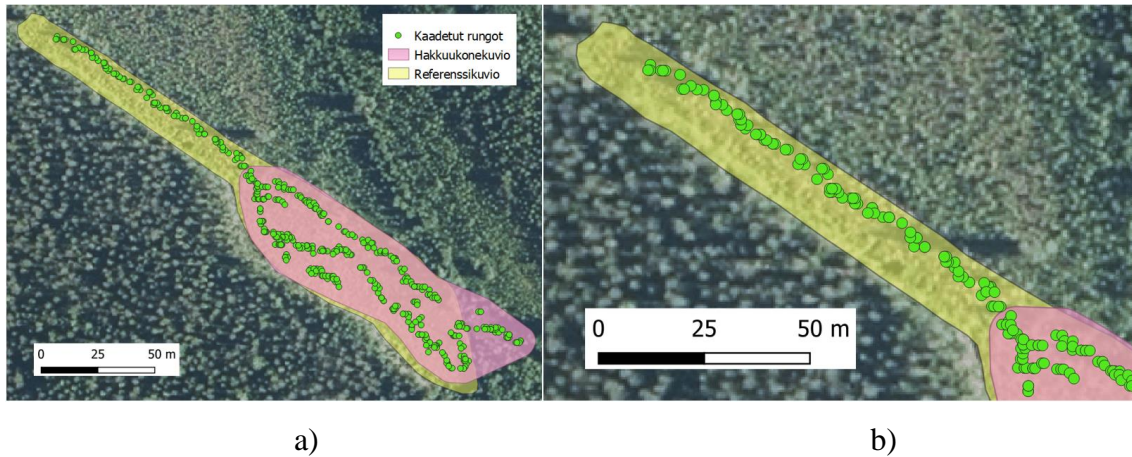
pääluokkaan: päätehakkuu, harvennus ja ensiharvennus. Eri hakkuutavoilla on erilaiset korjuutaksat. Pääsääntöisesti lohko sisältää vain yhtä hakkuutapaa, mutta joissakin tapauksissa ilmakuvista on havaittavissa, että esimerkiksi avohakkuun reunaan on tehty pieni harvennus tai avohakkuulle on jätetty siemen- tai suojuspuita. Samaan lohkoon hakatuista, lähekkäin olevista rungoista tuotetaan automaattisessa kuvioinnissa kuitenkin yhtenäinen kuvio, jonka hakkuutapa määräytyy lohkon hakkuutavan mukaan.

Ensimmäinen algoritmi erottaa kuvion ja kuviolle johtavat siirtymäurat toisistaan (Kuva 4). Algoritmi erottaa selkeästi leimikosta erillään olevat hakattujen runkojen sijaintipisteet erillisiksi siirtymäuriksi, jos niiden vierellä ei ole maksimietäisyydellä muita ajouria. Maksimietäisyydeksi ajouravälille on asetettu 30 metriä, ja urien kaartuminen huomioidaan etäisyyden määrittämisessä. Toimenpiteen hakkuutiedoista saadaan hakkuutapa sekä ajankohta, joiden avulla hakkuulohkot erotetaan toisistaan.



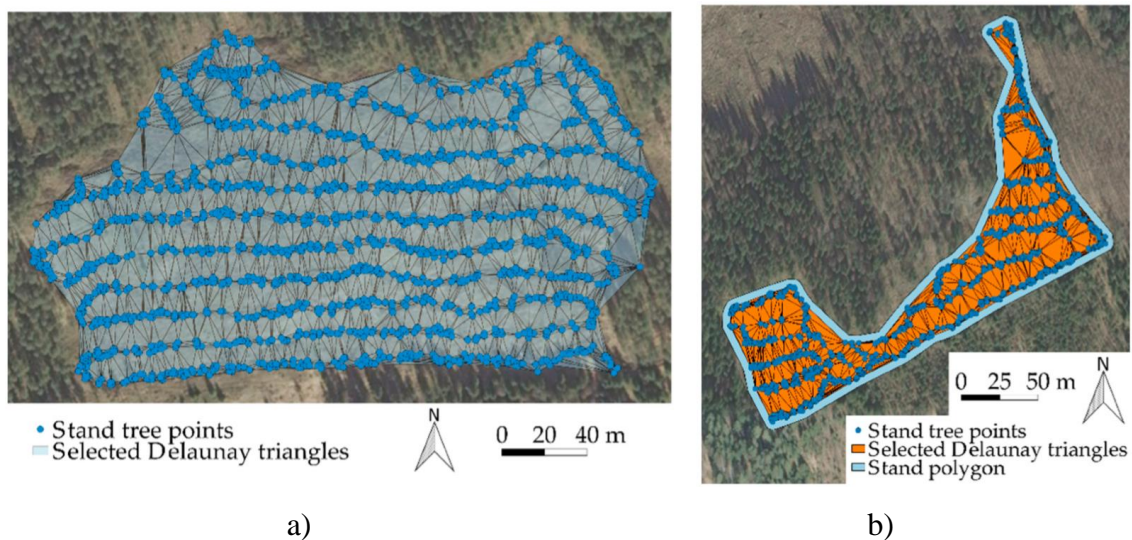
Kuva 4. Algoritmi I erottaa kuvioon kuuluvat kaadetut rungot (punaiset ja siniset pisteet) kuvion ulkopuolelta kaadetuista rungoista (keltaiset pisteet). (Melkas ym. 2020).

Toisinaan siirtymäuriksi tunnistetut pistejoukot voivat olla peräisin pitkänomaiselta kuviolta siirtymäuran sijasta (Kuva 5). Automaattisessa kuviointimenetelmässä nämä siirtymäurat, jotka ovatkin todellisuudessa kuvioita tai niiden osia, tunnistetaan hakattujen runkojen poistumatiheyden perusteella. Mikäli poistumatiheys yhtenäisellä siirtymäuralla on tarpeeksi suuri, siltä hakatuista rungoista tuotetaan erillinen kuvio. Jos yhden korjuulohkon kuviot – sekä algoritmista I suoraan saadut että riittävän tiheistä siirtymäurista löydetty – osuvat toisiinsa, ne yhdistetään.



Kuva 5. **a)** Kuvion luoteisnurkassa oleva alue on todellisuudessa avohakattu (digitointi ilmakuvasta keltaisella), mutta jonka automaattinen menetelmä on ensi vaiheessa tulkinnut siirtymäuraksi leimikon osan muodon takia (hakkuukonerajaus vaaleanpunaisella). Tällaisissa tilanteissa menetelmällä voidaan palauttaa riittävän poistumatiheyden siirtymäurien puut takaisin kuvioihin. **b)** Lähempi tarkastelu osoittaa, että luoteisnurkan puusto on hakattu eikä kyseessä ole pelkästään siirtymäura.

Algoritmi II muodostaa pisteparvesta kuvion. Riittävän lähellä toisiaan olevat pisteet yhdistetään käyttäen Delaunay-kolmiointia (Kuva 6a). Minimirajana Melkas ym. (2020) ovat käyttäneet kolmea suhteellisen lähellä toisiaan olevaa pistettä. Valmiin kuvion ympärille lisätään puskurivyöhyke (Kuva 6b), joka vastaa karkeasti hakkuukoneen puomin pituudesta ja GNSS-paikannuksen epätarkkuudesta johtuvaa laskennallista etäisyyttä.

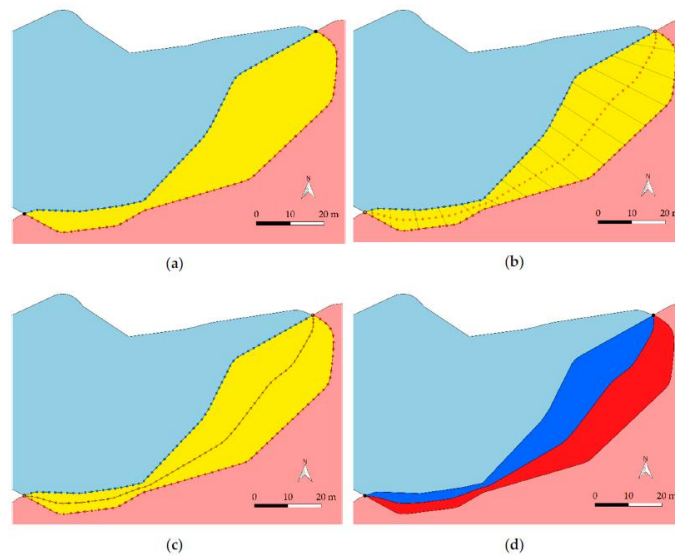


Kuva 6. Kuvion muodostaminen pisteparvesta. **a)** Sijaintipisteille on tehty kolmiointi. **b)** Kolmioituun polygoniin on lisätty vaaleansininen puskurivyöhyke (Melkas ym. 2020).

Kuvioilla, joilla hakkuukoneessa on käytetty tarkempaa paikannusta, puskurivyöhyke on 5 metriä, epätarkemmalla 3,2 metriä. Puskurivyöhykkeen arvoihin on päädytty aiempien

tutkimusten perusteella, joissa kuvioita on verrattu referenssikuvioihin (Melkas ja Riekkilä 2020, Melkas ym. 2020). Kuvioden sisään voi toisinaan jäädä alueita, joita ei ole hakattu.

Joillakin kuvioilla tapahtuu limittymistä eli kuviot leikkaavat toisiaan (Kuva 7). Algoritmi III erottelee vierekkäiset kuviot niin, etteivät ne mene päällekkäin toistensa kanssa ja niille saadaan yksinkertaiset rajat: a) Vierekkäiset kuviot ja niiden limittyvä osuus tunnistetaan. b) Osuuden reunat jaetaan näytteistuspisteisiin, joiden puoliväliin uusi kuvioraja luodaan. c) Vanhat kuviorajat poistetaan, ja uudet palat liitetään omiin kuvioihinsa. d) Valmis kuviointi, josta vanhat limittyvät alat on jaettu uudelleen algoritmin mukaisesti. Jos kuvioden väliin jää pieniä, alle 1 000 neliömetrin alueita, jotka eivät kuulu kumpaankaan kuvioon, ne puolitetään ja lisätään osaksi kuvioita. Kuvioden väliin jäävät alle 10 neliömetrin aukot yhdistetään jompaankumpaan kuvioon (Melkas ym. 2020). Saman kuvion sisään jäävät aukot jätetään kuvioihin, ja ne huomioidaan ajouralaskennassa määrittäessä kuvion pinta-alaa. Kuvioden aukkoja ei huomioida vertailtaessa referenssikuvioihin, koska aukot ovat yleensä niin pieniä, että niiden digitoiminen ilmakuvista on usein mahdotonta.



Kuva 7. Limittyvät kuviot, algoritmi III. **a)** Algoritmi tunnistaa limittyvät osuudet. **b)** Osuudet puolitetään näytteistuspisteiden avulla. **c)** Puolitetut alat liitetään osaksi oikeaa kuviota. **d)** Valmis kuviointi (Melkas ym. 2020).

Algoritmia III voidaan käyttää myös hakkuukonekuvioden viemiseen olemassa olevaan kuvioverkkoon, kuten Metsäkeskuksen kuviomuotoiseen metsävaratietoon. Tällöin kuvioden limittymistilanteissa saadaan tuotettua uudet, yksikäsitteiset kuviorajat.

Viimeisessä vaiheessa koostetaan kuviolta hakattujen runkojen tiedot, jos kuviolle osuu toisten lohkojen siirtymäurilta hakattuja runkoja. Kun kuvio runkotietoineen on valmis, siitä voidaan laskea kuviokohtaisia poistuman tunnuksia.

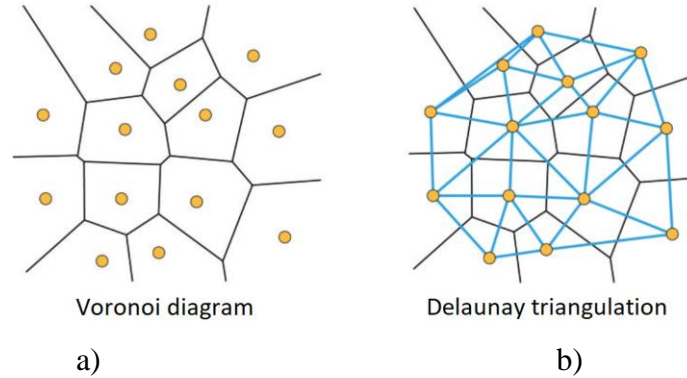
Aiempaa tutkimusta referenssikuvioiden vertailusta hakkuukonekuvioihin ovat tehneet Melkas ja Riekkä (2020) Etelä-Suomessa sijaitseville kuvioille pienehkössä mittakavassa. Tutkimuksessa verrattiin hakkuukonekuvioita ilmakuvareferensseihin sekä maastossa suoritetuilla tarkkuus-GNSS-mittauksilla muodostettuihin kuvioihin. Tutkimus katsoi Uudenmaan alueelta 455 kuviota sisältäen kaikkiaan 634 656 kaadettua runkoa. Tutkimuksen hakkuukoneaineisto oli kerätty 8/2015–9/2016. Vertailuaineistona toimi 27 maastokartoitettua sekä 42 ilmakuvista rajattua referenssikuviota. Tutkimus antoi lupaa via tuloksia hakkuukonetiedon luotettavuudesta sekä sopivuudesta toimenpidekuvioiden automaattiseen tuottamiseen ja hyödyntämiseen metsävaratietojen ajantasaistuksessa.

Melkas ja Riekkä (2020) havaitsivat tutkimuksessaan, että hakkuukoneen paikannustarkkuus vaikutti kuvioiden pinta-alavastaavuuteen. Melkas ym. (2018) käyttivät kuvionmuodostuksessa puskurivyöhykkeen arvoa 6,5 metriä, minkä huomattiin tuottavan liian suuria hakkuukonekuvioita: tarkemman paikannuksen hakkuukonekuvioilla pinta-alan yliarvio oli noin 4 prosentin luokkaa, epätarkemmalla paikannuksella paikoin jopa 10 prosenttia. Tämän jälkeen kuviointiparametreja säädettiin, jotta kuvioiden pinta-alat vastaisivat mahdollisimman tarkasti toisiaan riippumatta kuvioiden paikannustarkkuudesta. Kuvioparametrien säätämisen jälkeen kuvioiden pinta-alojen vastaavuus parani siten, että yli 0,75 hehtaarin kuvioilla yliarviota oli keskimäärin enää 1 prosentti. Päivitetyt puskurivyöhykkeen arvot ovat tarkemmalle paikannukselle 5 metriä ja epätarkemmalle 3,2 metriä (Melkas ym. 2020).

### ***1.3.2 Delaunay-kolmiointi laskennallisessa kuvionmuodostuksessa***

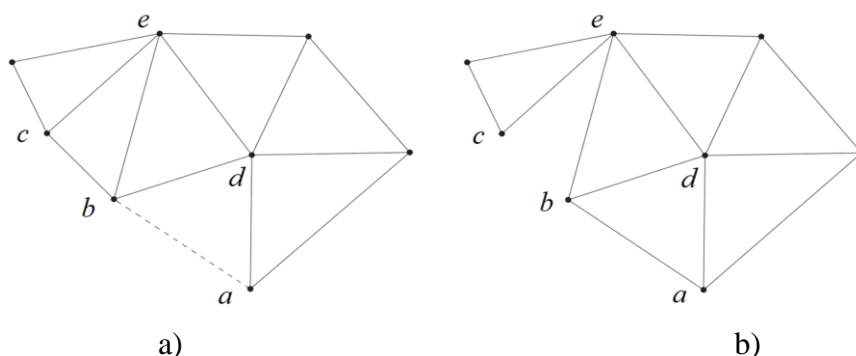
Havaintopisteiden joukon (pisteparvi) avulla voidaan pisteiden ympärille muodostaa automaattisesti kuvion muoto. Kuvioinnissa hyödynnetään Delaunay-kolmiointia. Delaunay-kolmiointia voidaan käyttää 2- ja 3-ulotteisessa avaruudessa. Delaunay-kolmiointia voidaan havainnoida Voronoi-polygonin avulla (Kuva 8). Voronoi-polygoni rajaa jokaisen havaintopisteen ympärille monikulmion, jonka sisällä oleva jokainen piste on lähimpänä kyseistä havaintopistettä (Kuva 8a) (Weiqiang & Hong 2012, Holopainen ym.

2015). Delaunay-kolmiointi voidaan 2-ulotteisessa avaruudessa muodostaa Voronoi-polygoneista yhdistämällä jokainen havaintopiste, jonka kanssa pisteellä on yhteinen Voronoi-polygonin sivu (Kuva 8b).



Kuva 8. **a)** Voronoi-polygoneja muodostettaessa jokainen tuntematon piste (punaiset pisteet) monikulmion sisällä saa saman arvon kuin niitä lähinnä oleva keltainen havaintopiste (vrt. vihreät nuolet). **b)** Delaunay-kolmioinnissa yhdistetään toisiinsa kaikki sellaiset keltaiset havaintopisteet, joilla on yhteinen Voronoi-polygonin sivu. Tuloksena on Delaunay-kolmiointi (siniset viivat). Alkuperäinen lähde: Weiqiang & Hong 2012.

Toinen tapa muodostaa pisteparvesta polygoni on Duckhamin ym. (2008) kehittämä algoritmi, joka sekin perustuu Delaunay-kolmiointiin. Pisteparven pisteet yhdistetään käyttäen kolmiointia, jolloin saadaan lähtökohdaksi konvekksi muoto, joka rajaa sisäänsä kaikki pisteet. Kolmiointiin sisältyy kuvion jatkuvuusehto. Sen mukaan kolmioista voidaan poistaa vain sellaisia sivuja, joiden kolmion ainakin yksi kulmapiste jää muun kuvion sisään (Kuva 9).



Kuva 9. Kolmioinnin jatkuvuusehto. **a)** Kuviossa sivu  $ab$  voidaan poistaa, koska kolmion  $abd$  kulmapiste  $d$  jää muun kuvion sisälle. **b)** Sen sijaan sivua  $bc$  ei voida poistaa, koska kolmion  $bce$  kulmapiste  $e$  ei jää kuvion sisään ja rikkoo kuvion näin jatkuvuusehdon (Duckham ym. 2008).

Sen jälkeen etsitään haluttu parametri, joka kuvastaa, miten paljon kolmioinnissa syntyneitä kolmionsivuja poistetaan lopullista kuviota varten. Parametri perustuu



kolmioinnissa syntyneiden kolmioiden sivujen pituuksiin. Sivujen pituudet normalisoidaan uudelleen niin, että suhteelliset pituudet ovat välillä 0–1. Parametrin arvo 1 tarkoittaa, että Delaunay-kolmioinnista ei poisteta yhtään kolmion sivua. Tällöin tuloksena on konvekksi muoto (Kuva 10a). Kuvassa 10b parametri on säädetty siten, että kuviosta ovat poistuneet c-kirjaimen ”sisällä” olevat sivut. Jos taas parametri on liian pieni ja kuviosta poistetaan kaikki jatkuvuusehdon täyttävät sivut (10c), kuviosta tulee rikkonainen. Äärimmäiset parametriarvot tuottavat yleensä joko liian yksinkertaisen konveksin kuvion tai liian kulmikkaan muodon. Parametria pitää säätää, jotta saavutetaan haluttu muodon tarkkuus. Lopullinen kuvionmuoto ja siten myös parametrin arvo määräytyy kuvioiden käyttötärpeen mukaan.

Duckhamin kolmioinnin ongelmana on, että parametrin säätäminen on tehtävä erikseen sen mukaan, mihin tarkoitukseen sitä käytetään. Parametrin arvon säätäminen voi olla hankalaa, koska se on suhteellinen pisteiden välisiin etäisyyksiin verrattuna. Voronoin-polygoniin perustuva kolmiointi sopii kuviorajaukseen, koska siinä voidaan valita kuvi-oon päätyvien kolmion sivuja rajaava metrimääräinen maksimietäisyys pisteiden välille.

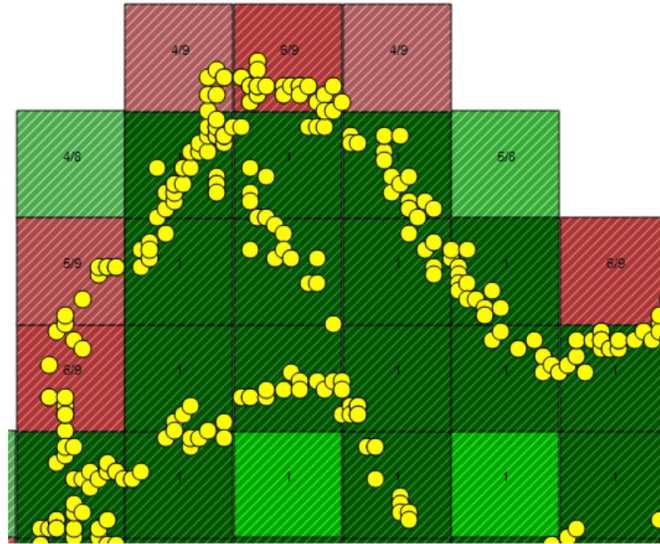


a.  $0.77 < \lambda_P \leq 1.00$    b.  $0.39 < \lambda_P \leq 0.51$    c.  $0.00 < \lambda_P \leq 0.20$

Kuva 10. Parametriin perustuva kolmiointimalli (Duckham ym. 2008).

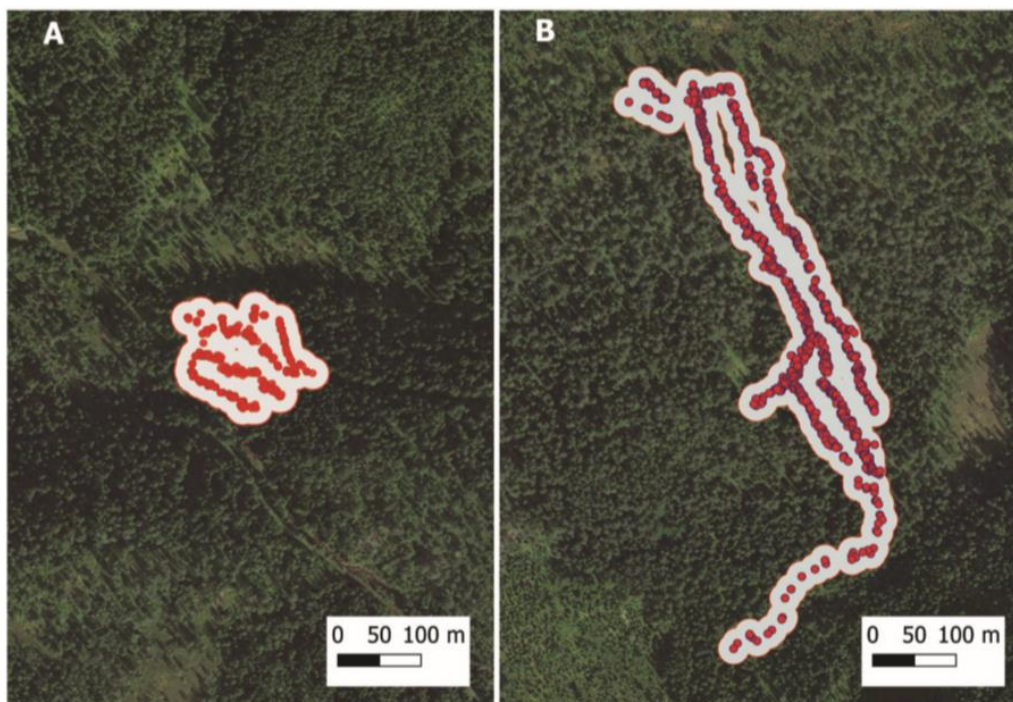
### 1.3.3 Muita hakkuukonetietoihin perustuvia kuviointimenetelmiä

Myös Skogforsk on kehittänyt hakkuukoneen sijainnin määrittämiseen perustuvaa menetelmää, jolla voidaan arvioida hakatun alueen pinta-alaa. Siinä käytetään apuna hilaruudukkoja (13 x 13 metriä), jolle hakkuukoneen sijainnit asetetaan (Kuva 11). Kuhunkin hilaruutuun osuvien sijaintipisteiden määrä lasketaan, ja sen perusteella ruutu joko valitaan kuvion alueeseen, tai jätetään siitä pois. Muodostuva kuvio on siten reunoiltaan nelikulmainen. (ks. lisää Bhuiyan ym. 2016)



Kuva 11. Esimerkkikuva Skogforskin kuviointimenetelmästä, jossa käytetään apuna 13 x 13 metrin hila-ruudukkoja (Bhuiyan ym. 2016).

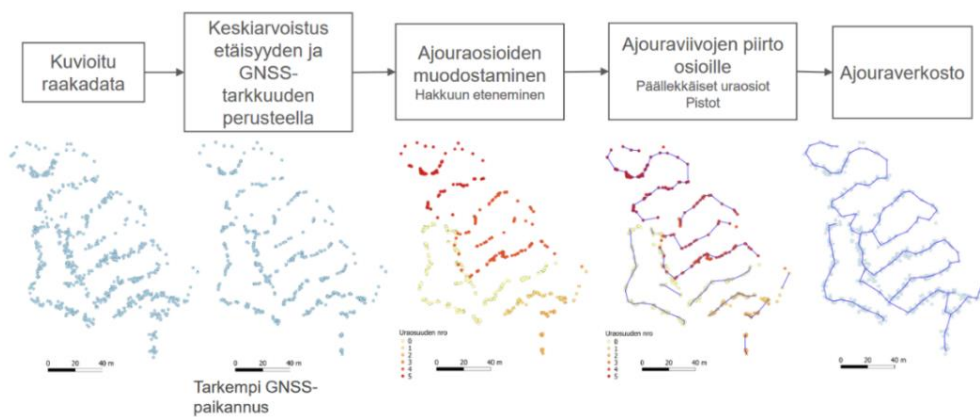
Ottavianin ym. (2020) työryhmän puustotunnusten tarkasteluun kehittämä kuviointimenetelmä perustuu hakkuukoneen sijaintipisteisiin ja pisteille asetettuihin puskurivyöhykeisiin (Kuva 12). Puskurivyöhyke muodostaa hakkuukoneen kunkin sijaintipisteen ympärille ympyrän, joista jokainen sulautetaan yhteen yhdeksi kuvioksi. Tuloksena on kuviorajaus, jonka reuna koostuu erimittaisista ympyröiden kaarista (ks. lisää Belbo & Talbot 2020, Ottaviani ym. 2020).



Kuva 12. Norjalaisten kehittämä menetelmä muodostaa kuviorajan, jonka reunat koostuvat ympyröiden kaarista (Belbo & Talbot 2020, Ottaviani ym. 2020).

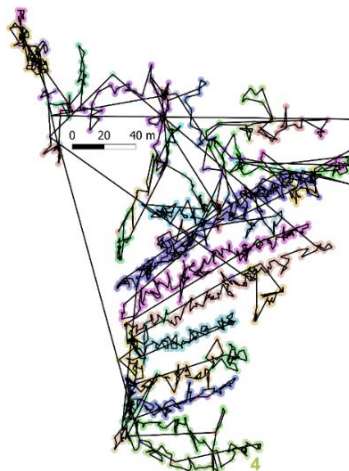
## 1.4 Ajouralaskenta ja ajouraverkoston muodostaminen automaattisesti

Kun ajouraverkostoa muodostetaan automaattisesti, hakkuukoneen pisteparvista laskeaan niin sanottu spatiaalinen keskiarvoistus, jossa hakkuukoneen yksittäiset sijaintitiedot keskiarvoistetaan muutamien lähellä olevien pisteiden avulla (Kuva 13). Tämä vaihe ta-soittaa GNSS-paikannuksessa syntyvää epätarkkuutta. Keskiarvoistuksessa huomioidaan raakadatan kaikki hakkuukonepisteet ja koska keskiarvoistus tehdään pisteiden etäisyyden perusteella, puiden todellista kaatojärjestystä hakkuun etenemissuuntaan nähden ei huomioida.



Kuva 13. Ajouraverkoston muodostaminen automaattisesti (Riekkä ym. 2019).

Keskiarvoistuksen jälkeen pistejoukosta muodostetaan ajouraosio. Ajouraosio on ”sel-laisten peräkkäin hakattujen puiden joukko, jotka ovat riittävän lähellä toisiaan” (Riekkä ym. 2019). Ajouraosioiden avulla voidaan seurata hakkuun etenemistä kuviolla, vaikka osioiden puut eivät välttämättä ole hakkuujärjestyksessä (Kuva 14).



Kuva 14. Reitti, jossa hakkuukoneen runkokohtaiset sijainnit on yhdistetty hakkuujärjestyksessä, tuottaa sekavan lopputuloksen, joka ei vastaa todellista ajourastoa (Riekkä ym. 2019).



Ajouraverkostoa ei kuitenkaan voida muodostaa käsittelemättömästä sijaintitiedosta suoraan puiden kaatojärjestyksessä johtuen GNSS-paikannuksessa ilmenevistä epätarkkuuksista ja hakkuun etenemisen edestakaisesta liikkeestä pääkulkusuunnassa (Ovaskainen ym. 2019).

Osioiden pisteistä muodostetaan yksinkertaiset uraviivat, jolloin hakkuukoneen edestakainen liike jätetään huomiotta. Osioihin lisätään pistot uran sivuille. Lopuksi erilliset osiot kootaan yhteen yhdeksi ajouraverkostoksi, jos ajourien välinen etäisyys on sopiva (Rieki ym. 2019). Valmis ajouraverkosto on yksinkertainen vektorimuotoinen verkosto, josta on laskettavissa kuviokohtaiset ajouratunnukset, joita voidaan edelleen verrata esimerkiksi hyvän metsänhoidon suosituksiin.

Automaattisesti hakkuukoneen runkokohtaisesta sijaintiaineistosta tuotetun ajouraston etuna on, että se tuottaa yksikäsitteisen reittiverkoston koko kuviolle. Ajouraverkosto ei sisällä hakkuukoneen edestakaisia ajokertoja kuviolla muun muassa vuoronvaihdon ja tankkauksen yhteydessä – sen sijaan hakkuukoneen omassa reittinauhoituksessa kaikki ajokerrat kuviolla tallennetaan erillisinä. Eri hakkuukoneiden aineistoista laskennallisesti tuotetut ajouraverkostot ovat lisäksi keskenään vertailukelpoisia konemerkkikohtaisten uranauhointusten asetuksista riippumatta.

## **1.5 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset**

Tällä tutkimuksella on kaksi päätavoitetta. Ensimmäinen tavoite on tutkia, voidaanko hakkuukonetietoa hyödyntää riittävän tarkkojen kuviorajojen automaattisessa määrittämisessä. Työssä verrataan hakkuukonetiedon pohjalta automaattisesti muodostettuja hakkuukonekuviota käsin digitoituihin referenssikuvioihin, jotka ovat ilmakuvan perusteella tehtyjä, oikeana pidettäviä toimenpidekuviota. Kuinka hyvin hakkuukonetiedon perusteella tehdyt kuviorajaukset vastaavat ilmakuvareferenssejä? Onko vastaavuus niin suurta, että hakkuukonekuviota voitaisiin käyttää yhtenä lähteenä metsävaratietojen ajantasaistuksessa riittävällä luotettavuudella?

Toinen tavoite on automaattisen ajouralaskennan validointi: Ovatko hakkuukonetiedon pohjalta määritetyn ajouraverkoston tunnukset realistisia, ja miten hyvin niiden avulla voidaan todentaa ajouraverkostolle asetettujen suositusten toteutumista? Miten

ajouralaskennassa saadut tulokset vaihtelevat olosuhdetekijöiden mukaan: muuttuvatko tulokset merkittävästi esimerkiksi kuvioiden pinta-alasta, hakkuutavasta tai sijainnista riippuen? Ajouratunnukset laskettiin automaattisesti koko hakkuukonekuviolle ja simuloimalla Metsäkeskuksen korjuujäljen tarkastuksen maastokoealaotantaa.

## **2 AINEISTO JA MENETELMÄT**

### **2.1 Aineiston esittely**

Tutkimuksessa tarkasteltiin hakkuukonetietoa, joka on kerätty automaattisesti hakkuukoneiden työskennellessä ja liikkeessa kuvioilla. Tutkimuksen aineisto käsitti lohkoja Manner-Suomessa pääkaupunkiseudulta Oulun ympäristöön saakka. Aineisto koostui korjuulohkoista, joille on tehty pääasiassa ensiharvennuksia, kasvatushakkuita tai päätehakkuita. Kaikkiaan aineisto käsitti noin 3 000 lohkoa ja 5 316 214 sijaintipistettä. Hakkuukonetieto oli kerätty eri valmistajien hakkuukoneilla 12/2017–06/2018.

Hakkuukoneilta kerätty aineisto esikäsiteltiin kuviointiprosessia varten Metsätehon purkuohjelmilla. Aineiston puille ja lohkoille annettiin yksikäsitteiset tunnistenumerot, joiden avulla rungot identifioitiin lohkoille ja lohkot voitiin erottaa toisistaan (Melkas ym. 2020). Tämän jälkeen hakkuukonedata siirrettiin QGIS-paikkatieto-ohjelmistoon (versio 2.14).

Hakkuukoneen sijaintitiedot tallentuvat StanForD-standardin mukaisesti runkokohtaisesti maantieteellisinä koordinaatteina (WGS84, World Geodetic System 1984), jotka muutettiin ETRS-TM35FIN-koordinaatistoon paikkatieto-ohjelmistossa. Esikäsittelyn yhteydessä tuotettiin myös pelkästään hakkuukoneiden sijaintiaineistoon perustuvat las kennalliset GNSS-vastaanotinten tarkkuusluokitukset asteikolla ”tarkempi” ja ”epätarkempi” kaikille aineiston lohkoille (Melkas ym. 2020).

Hakkuukonetiedon pohjalta tuotettiin paikkatieto-ohjelmassa Metsätehon kuviointimenetelmällä (ks. luku 1.3.1) automaattiset hakkuukonekuviot, joita koko aineistosta muodostui kaikkiaan 4 440. Kuvioinnissa käytettiin päivitettyjä puskurivyöhykkeen arvoja (ks. luku 1.3.1). Kuvioille tuotettiin tämän jälkeen automaattiset ajouraverkostot (ks. luku

1.4), joille laskettiin edelleen koko kuvion näytteistävä keskimääräinen ajouraväli. Lisäksi kuvioille tehtiin keskimääräisen ajouravälin maastomittausta simuloiva laskenta, joka oli toteutettu Metsätehossa paikkatieto-ohjelmassa toimivana pilottiohjelmana. Kaikki paikkatieto-ohjelmassa lasketut kuviokohtaiset tulokset siirrettiin Excel-ohjelmaan. Excelissä suurta datamäärää oli helppo analysoida ja siitä pystyi etsimään huomionarvoisia ominaisuuksia ja korrelaatioita myös tilastollisin keinoin.

Automaattisten kuviorajausten validointiin käytettiin vain sellaisia hakkuukonekuvioita, joille pystyttiin digitoimaan referenssikuvio toimenpiteen jälkeen otetulta ortoilmakuvasta (referenssikuvioiden digitointi on kuvattu tarkemmin luvussa 2.2). Ajourasuureiden tarkastelussa käytettiin sen sijaan kaikkia kuvioita, joille pystyttiin tuottamaan automaattinen ajouraverkosto. Automaattisen ajouraverkoston ajouravälien ja maastomittausta simuloimalla saatujen ajouravälien vertailussa käytettiin niitä kuvioita, joille saatiin lasketua ajouraväli molemmilla tavoilla.

Tutkimuksen koko aineisto jakautui kaikkiaan kolmeen ala-aineistoon, joita käsitellään eri luvuissa omina kokonaisuuksinaan. Aineisto on jaettu pienempiin osiin, jotta aineisto olisi kunkin tarkastelun kohdalla yhtenäinen ja ilmiöiden keskinäinen vertailu luotettavampaa. Tästä syystä automaattisten kuvioiden vertailulle referensseihin (referenssiaineisto), automaattisille ajouraväleille (ajoura-aineisto) ja ajouravälin keskimääräisen maastomittauksen simuloinnille (simulointiaineisto) on oma ala-aineistonsa (Taulukko 1).

Taulukko 1. Koko aineisto ja sen jakautuminen ala-aineistoihin.

Hakkuutapa	Koko aineisto (kpl)	Referenssiaineisto (kpl)	Ajoura-aineisto (kpl)	Simulaatioaineisto (kpl)
Ensiharvennus	301	21	298	171
Harvennus	2021	83	1943	1222
Avohakkuu	1685	204	1615	786
Muut hakkuutavat	433	12	402	184
- Ylispuiden poisto	183	3	172	73
- Suojuspuuhakkuu	31	-	29	16
- Siemenpuuhakkuu	132	7	125	69
- Muu hakkuu tai toimenpide	87	2	76	26
<b>Yhteensä</b>	<b>4440</b>	<b>320</b>	<b>4258</b>	<b>2363</b>

Kaikki ala-aineistot sisältävät kolme yleisintä hakkuutapaa – ensiharvennus, harvennus ja avohakkuu – sekä vaihtelevan määrän muita hakkuutoimenpiteitä. Aineiston tarkastelussa keskitytään nimenomaan yleisimpiin hakkuutapoihin. Muut hakkuutavat, jotka ovat

luonteeltaan huomattavasti vähäisempiä ja epäsäännöllisempiä, on ilmoitettu yleensä taulukoissa omina kokonaisuuksinaan, mutta niiden analyttinen tarkastelu jää vähemmälle.

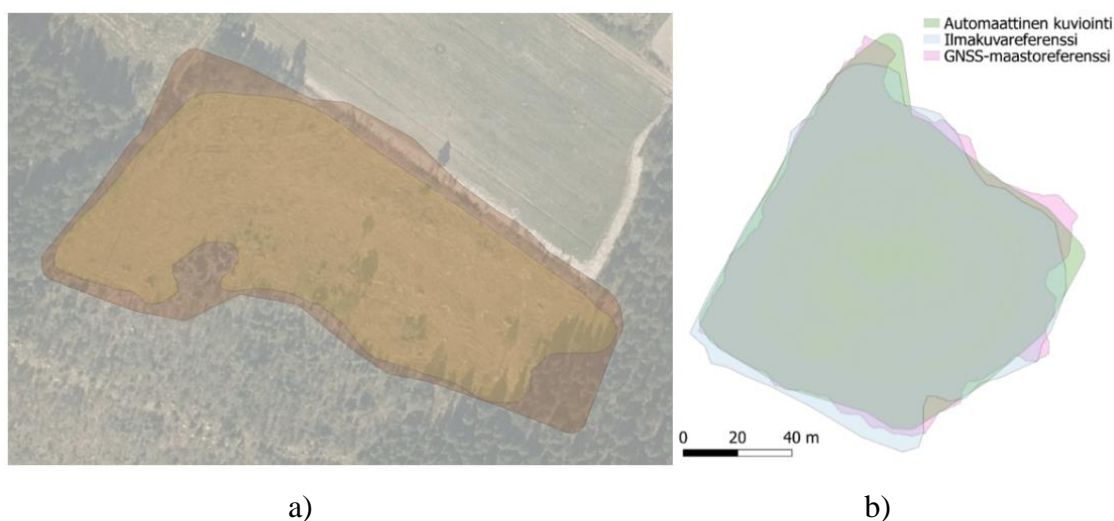
## **2.2 Hakkuukonekuvioiden vertailu referenssikuvioihin**

Tässä työssä hakkuukoneen tallentaman hakkuukoneen sijaintitiedon perusteella automaattisesti tuotettuja kuviorajauksia verrattiin ilmakuvista digitoituihin referenssikuvioihin. Ilmakuva voidaan laskennallisin keinoin muokata ortoilmakuvaksi, jossa maanpinta on korjattu tasokarttaa varten ja näkyy kuvassa kohtisuoraan (Maanmittauslaitos 2020). Kuvista nähdään metsänkäsittelytoimenpiteet puustoisilla alueilla. Referenssikuvioiden digitointia varten tarvittiin kultakin kuviolta tehdyn toimenpiteen jälkeinen ilmakuva. Vanhoja ja uusia ilmakuvia vertaamalla pystyttiin toteamaan tehdyt hakkuutoimenpiteet ja määrittämään kuviorajat visuaalisesti. Ilmakuvadata hankittiin Maanmittauslaitoksen (MML) avoimesta WMS-katselupalvelusta.

Hakkuukonetieto oli kerätty joulukuun 2017 ja kesäkuun 2018 välisenä aikana ja ilmakuva-aineisto oli vuosilta 2018–2019. Aineiston ajallisen päällekkäisyyden takia osalle hakkuukonekuvioista ei löytynyt hakkuun jälkeistä ilmakuvaa; aineistossa oli tapauksia, joissa ilmakuva oli otettu keväällä 2018, mutta kuvion hakkuu oli tehty vasta myöhemmin loppukeväällä tai alkukesästä. Kaikkiaan 1131 kuviolle oli saatavilla hakkuun jälkeinen ilmakuva. Nämä kuviot käytiin läpi yksitellen, ja niistä digitoitiin jokainen, josta oli mahdollista tehdä yksiselitteinen kuviorajaus. Hakkuun jälkeen otettuja kuvia verrattiin ennen hakkuuta otettuihin ortoilmakuviin, joissa hakkuu ei vielä ollut nähtävissä. Suuri osa kuvioista oli mahdotonta digitoida. Tällaisia olivat esimerkiksi harvennushakkuut, joissa kuviorajat eivät erottuneet puiden vähäisen poistuman takia.

Hakkuukohteet digitoitiin ortoilmakuvilta käsin polygonimuotoisiksi referenssikuvioiksi mahdollisimman tarkasti käyttäen QGIS-ohjelmaa ja sen versiota 3.4 Madeira (Kuva 15). Digitointi tehtiin aineiston kaikille yksiselitteisille kuvioille. Kuvioista rajattiin tarkastelun ulkopuolelle kaikki, joista ei pystytty riittävällä varmuudella todentamaan todellisen hakkuun rajoja. Erityisesti pienten kuvioiden kohdalla tarkasteltiin tapauskohtaisesti, onko digitointi perusteltua. Digitoinnissa painottuivat selkeärajaiset toimenpiteet kuten avohakkuut ja selvästi erottuvat harvennukset. Sen sijaan siemenpuuhakkuut, ylispuiden

poistot ynnä muut epämääräiset ja ilmakuvilta vaikeasti tulkittavat toimenpiteet rajautuivat lopullisen tarkastelun ulkopuolelle.



Kuva 15. **a)** Kuvassa näkyvät ortoilmakuvan päällä hakkuukonetiedoista luotu automaattinen kuvioraja (ruskea) ja ilmakuvan avulla digitoitu kuvioraja (keltainen). **b)** Esimerkki aiemmasta tutkimuksesta (Melkas & Riekkä 2020), jossa näkyy automaattisen kuvioinnin ja ilmakuvareferenssin lisäksi tarkkuuspaikannuslaitteella muodostettu maastoreferenssi.

Digitointikelpoiset kuviorajaukset tarkastettiin visuaalisesti kolmeen kertaan. Sen jälkeen referenssikuvioiden lopulliseksi lukumääräksi tuli 320 kappaletta. Referenssikuvioiden jakauma suhteessa koko aineistoon on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Koko aineiston kuviot, niiden osuudet aineistossa ja pinta-alat hakkuutavoittain sekä referenssiaineiston kuviot, niiden osuudet aineistossa ja pinta-alat hakkuutavoittain.

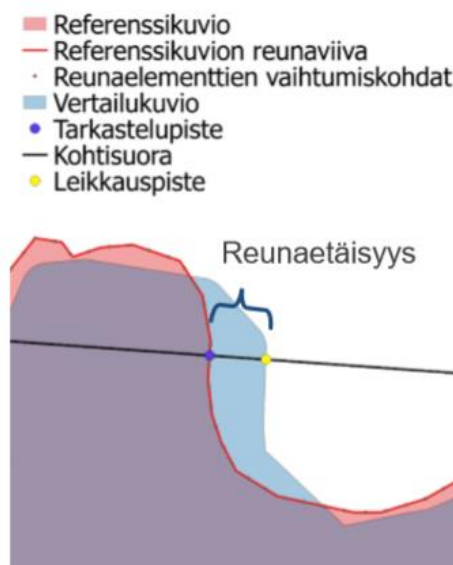
Hakkuutapa	Koko aineisto			Referenssiaineisto		
	n	%	Pinta-alojen keskiarvo (ha)	n	%	Pinta-alojen keskiarvo (ha)
Ensiharvennukset	301	6,8	1,7	21	6,6	2,1
Harvennukset	2021	45,5	2,5	83	25,9	3,8
Avohakkuut	1685	38,0	1,4	204	63,8	1,8
Muut hakkuutavat	433	9,8	1,3	12	3,8	1,8
Yhteensä	4440	100	1,9	320	100	2,4
Pinta-alojen vaihteluväli (ha)	0,007–44,7			0,14–30,9		
Pinta-alojen mediaani (ha)	1,1			1,5		
Pinta-alojen keskihajonta (ha)	2,6			3,0		

Kuviot ryhmiteltiin tarkasteluja varten eri kokoluokkiin, jolloin voitiin helpommin todentaa erikokoisten kuvioiden poikkeavia ominaisuuksia. Hakkuutavan vaikutusta paikannuksen ja kuviorajauksen tarkkuuteen tutkittiin vertaamalla etenkin avohakkuuta ja harvennuksia keskenään. Ilmakuvareferensseistä voitiin suorittaa myös alueellista vertailua;

onko eri puolilta Suomea kerätystä aineistossa aluekohtaisia eroja ja löytyykö niille selittäjää?

Automaattisesti tuotettujen hakkuukonekuvioiden *pinta-alojen suhdeluku* on olennainen suure kuvioiden osuvuuden selvittämisessä. Pinta-alojen suhdeluku saatiin jakamalla hakkuukonekuvion pinta-ala referenssikuvion pinta-alalla. Pinta-alojen suhdeluvun saadessa arvon 1 hakkuukonekuvio ja referenssikuvio ovat samansuuruiset. Kun arvo on suurempi kuin 1, hakkuukonekuvio on referenssikuviota suurempi. Kuvioiden pinta-alat ja piirit saatiin suoraan aluerajausten geometrioista paikkatieto-ohjelmassa. Lisäksi kuviosta tarkasteltiin myös sijainnin ja muodon vastaavuutta.

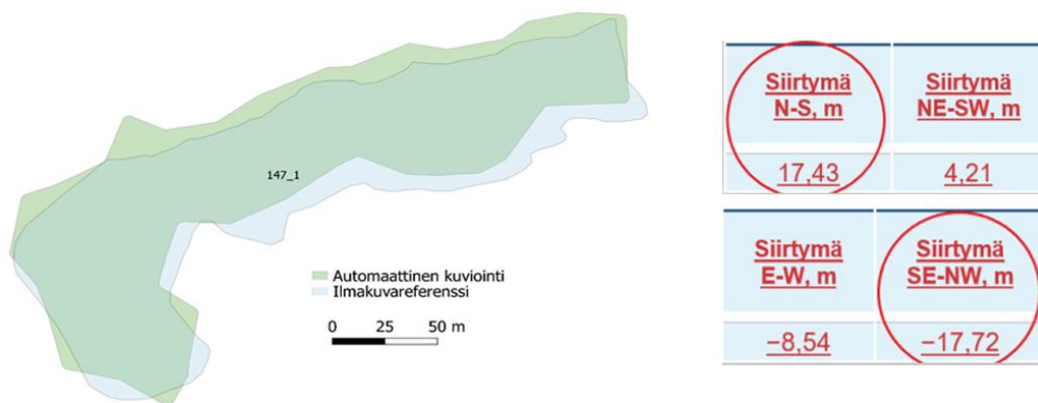
Kuvioiden sijainnin vastaavuutta tutkittiin vertailemalla kuvioalueita rajaavien reunojen sijainteja referenssikuvioihin nähden. Kuvioreunojen osuvuus laskettiin Metsätehon kehittämällä laskentatyökalulla, jossa referenssikuvion piiri näytteistettiin tasaisin välimatkoin (Kuva 16). Näytteistyspisteet olivat kuvion piirillä 5 metrin välein. Viereiset pisteet yhdistettiin janalla, minkä jälkeen mitattiin janan keskipisteestä keskinormaalini suuntaisesti referenssikuvion piiriin etäisyys hakkuukonekuvion reunasta. Tämän jälkeen etäisyysarvoista laskettiin kuviokohtaiset keskiarvot. Positiivinen lukema tarkoittaa, että hakkuukonekuvion reuna on keskimäärin enemmän referenssikuvion ulkopuolella, kuten kuvassa 16.



Kuva 16. Esimerkki referenssikuvion ja hakkuukonekuvion reunojen osuvuuden määrittämisestä. Tasaisin välimatkoin näytteistetyltä referenssikuvion kehältä mitataan kohtisuora etäisyys tarkastelukuvion (tässä hakkuukonekuvio) reunan. (Melkas ja Riekkö 2020).

Hakkuukonekuvion ja referenssikuvion välisten reunaetäisyyksien perusteella voitiin tulkitä, miten hyvin kuviot ovat osuneet kohdakkain. Laskennan pohjalta tehtiin kullekin kuviolle histogrammi, jossa on kuvattuna näytteistyspisteiden lukumäärä sekä reunaetäisyydet yhden metrin luokissa. Histogrammista nähdään nopeasti, mikäli siirtymien jakauma on epätasainen tai siirtymät ovat systemaattisesti kuvion ulko- tai sisäpuolella. Jos taas histogrammi on tasaisen kaksihuippuinen, kuviolla on selvää siirtymää, mutta kuvioiden pinta-alat saattavat silti vastata hyvin toisiaan.

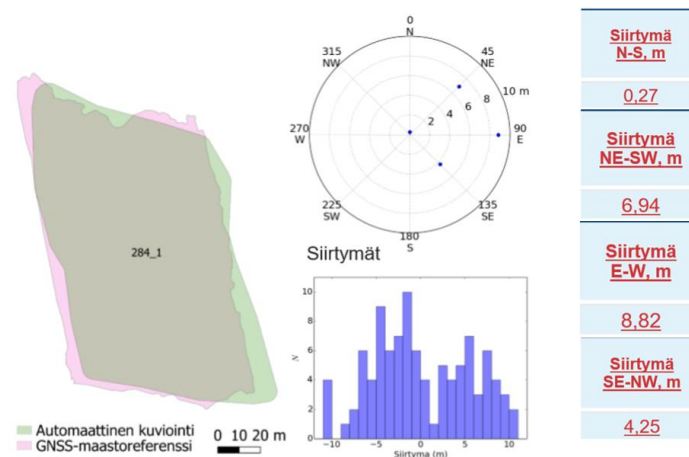
Kuvioilta määritettiin, miten paljon ne ovat kokonaisuudessaan siirtyneet pää- ja sivuilmansuunnissa. Ilmansuuntien mukaisen siirtymän tarkasteluun käytettiin samaa näytteistystä kuin reunaetäisyyden määrittämisessä. Ilmansuunnan siirtymäksi laskettiin siirtymien keskiarvo niistä referenssikuvion keskinormaaleista saaduista etäisyshavainnoista, joiden suunta poikkesi tarkasteluilmansuunnasta korkeintaan  $\pm 45$  astetta. Näistä laskettiin edelleen ilmansuuntien keskiarvojen erotukset (N-S, NE-SW, E-W, SE-NW) joiden suuruusluokka kuvastaa kuvion siirtymää. Positiivinen arvo tarkoittaa hakkuukonekuvion siirtymää ensin mainittuun ilmansuuntaan, negatiivinen arvo siirtymää jälkimmäiseen ilmansuuntaan. Kuvan 17 esimerkkituloksissa kuvion siirtymä on voimakkainta pohjoiseen (positiivinen arvo) ja luoteeseen (negatiivinen arvo). Kuvan 18 kuvio on puolestaan siirtynyt itä-länsisuunnassa, mutta sen pinta-alavastaavuus on silti hyvä.



Kuva 17. Esimerkkitulokset kuvion siirtymistä eri ilmansuunnissa.

Siirtymien laskenta toimii hyvin suurilla kuvioilla, mutta pienillä kuvioilla laskentaan tuli toisinaan liian vähän näytepisteitä. Arvojen mukaan kuviolla saattoi olla siirtymää usein vastakkaisiinkin suuntiin, mikäli kuvion näytteistyspisteet sattuivat sopivasti referenssikuvion sisä- ja ulkopuolelle pitkin kuvion piiriä. Kaiken kaikkiaan, näin lasketut

siirtymän numeeriset arvot ovat vain viitteellisiä, ja siirtymiä tarkasteltaessa oli tarpeen tukeutua lisäksi visuaalisiin havaintoihin (Melkas ja Riekkö 2020).



Kuva 18. Automaattinen kuviointi on selvästi siirtynyt itään päin, mikä näkyy myös ilmansuuntadiagrammissa. Histogrammi näyttää näytteistyspisteiden lukumäärän ja tarkasteltavien kuvioiden reunojen välisten etäisyyksien jakauman yhden metrin luokissa. Kaksihuippuinen histogrammi tarkoittaa, että siirtymä on melko symmetristä molemmin puolin kuviota, joten kuvioiden pinta-alat vastaavat hyvin toisiaan. Kuvan oikean reunan taulukko sisältää kuvion 284\_1 siirtymät neljässä suunnassa (Melkas ja Riekkö 2020). Ks. myös liite 1.

Automaattisen hakkuukonekuvion pinta-alan ja sijainnin osuvuus riippuvat yleisesti ottaen hakkuukoneen paikannustarkkuudesta. Paikannukseen vaikuttavat kulloinkin satelliittigeometria eli satelliittien sijainti suhteessa paikannuslaitteeseen, paikannussignaalin voimakkuus ja ilmakehän ominaisuudet (Holopainen ym. 2015). Paikannusvirhettä voi syntyä paitsi puuston myös maaston vuoksi; rinteet ja mäet muodostavat luonnollisia esteitä signaalille, jolloin tietystä suunnasta tuleva signaali saattaa olla epätarkka.

Hakkuukonekuvioissa voi lisäksi olla aineiston keruutavan tai kuvionmuodostuksen aiheuttamaa siirtymää esimerkiksi kuvioilla, joissa hakkuukone on kaatanut hakkuualueen puita tieltä käsin. Tällöin automaattisen menetelmän tuottama hakkuukonekuvio laajentuu kuviorajan puskuroinnin vuoksi tien toisellekin puolelle, josta runkoja ei ole kaadettu. Digitoinnissa pyrittiin näissäkin tapauksissa rajaamaan referenssikuvioon pelkästään hakattu alue.

Hakkuukonetietojen ja kuvioinnin epätarkkuudet vaikuttavat pienillä kuvioilla pinta-alan vastaavuuteen suhteellisesti suurilla kuvioilla enemmän. Ilmiötä on havainnollistettu neliön muotoiselle kuviolle taulukossa 3. Esimerkiksi, jos 0,75 hehtaarin kokoisen kuvion

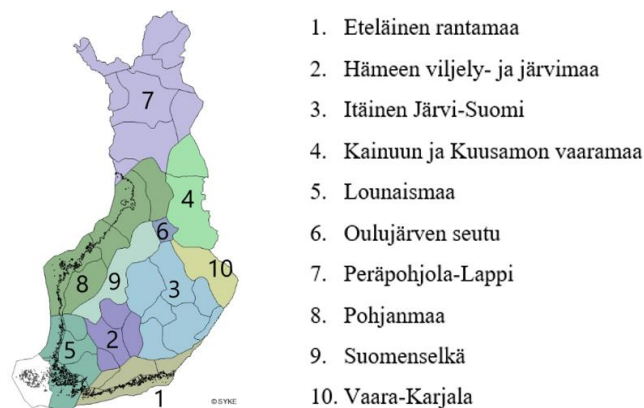


reunaa siirretään 1 metrin verran ulospäin kuvastamaan sijainnin virhettä, kuvion pinta-ala kasvaa 4,7 prosenttia. Sen sijaan 10 hehtaarin kuviolla pinta-ala kasvaa 1 metrin virheellä enää 1,3 prosenttia. Taulukon 3 pinta-alavirheet ovat suuntaa antavia, koska todellisuudessa kuvio harvoin laajenee tasaisesti joka suuntaan. Luvut auttavat kuitenkin hahmottamaan, millaisen vaikutuksen suhteellisen pienikin ero hakkuukonekuvion sijainnin paikannuksessa voi pinta-alojen suhdeluun aiheuttaa.

Taulukko 3. Systemaattisen sijaintivirheen vaikutus ja sen havainnollistaminen. Taulukkoon on laskettu pinta-alavirhe (%) eri kokoisille neliön muotoisille kuviolle silloin, kun kuvion reuna on siirtynyt joka puolelta kuviota tasaisesti ulospäin systemaattisen virheen verran.

Kuvion pinta-ala	Systemaattinen virhe (m)					
	0,5	1	2	3	4	5
	Pinta-alavirhe (%)					
0,75 ha	2,3	4,7	9,4	14,2	19,1	24,1
1,5 ha	1,6	3,3	6,6	10,0	13,4	16,9
3 ha	1,2	2,3	4,7	7,0	9,4	11,8
5 ha	0,9	1,8	3,6	5,4	7,3	9,1
10 ha	0,6	1,3	2,5	3,8	5,1	6,4

Hakkuutapakohtaisen tarkastelun lisäksi aineistolle tehtiin aluekohtainen tarkastelu. Ympäristöministeriön maisema-alueityöryhmän muodostamassa jaossa Suomi on jaettu kymmeneen toisistaan poikkeavaan maisemamaakuntaan (Kuva 19). Alueiden rajat eivät ole jyrkkiä, mutta ne ilmentävät alueelle ominaisia piirteitä ja maisemia (Ympäristöministeriö 1992). Alueiden erilaiset maastonpiirteet saattavat näkyä esimerkiksi kuvioiden pinta-alojen vaihteluissa. Aineistossa kuvioita on kaikkiaan kahdeksasta maisemamaakunnasta, vain Kainuun ja Kuusamon vaaramaan alueelta ei ole ainuttakaan kuviota. Referenssikuvioita ei ole myöskään Peräpohjola-Lapin alueelta. Lisäksi Oulujärven seutu ja Suomenselkä on yhdistetty yhdeksi alueeksi tässä tarkastelussa.



Kuva 19. Suomen ympäristökeskuksen maisemamaakuntakartta (Ympäristöministeriö 1992).

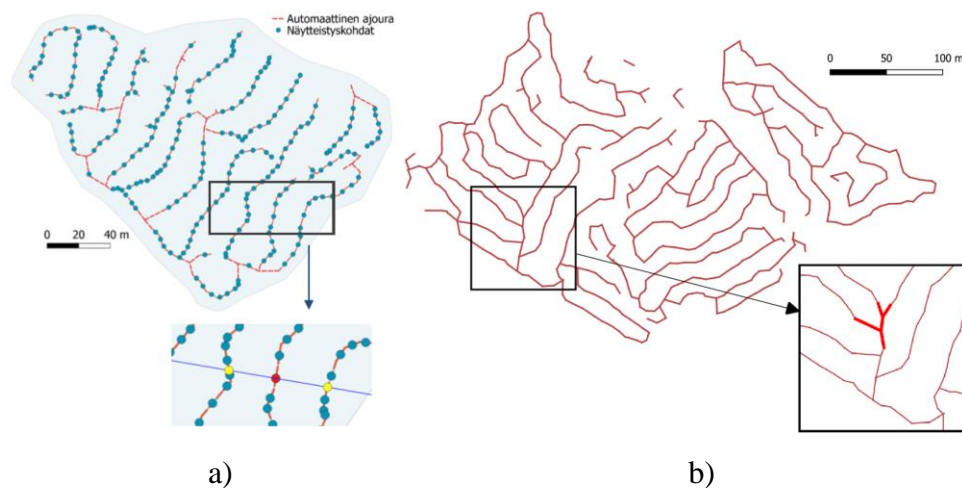
## 2.3 Ajouralaskenta

Hakkuukoneen sijaintitiedoista tuotettujen ajouraverkostojen avulla laskettiin kuviokohtaisia ajouratunnuksia. Koko aineiston 4 400 kuviosta ajouratunnukset saatiin laskettua 4258 kuviolle. Ajouratunnusten tarkastelussa pyrittiin vertaamaan toisiinsa eritoten pääte- ja harvennushakkuuta. Pienten kuvioiden kohdalla oli kiinnostavaa tutkia, miten tulokset muuttuvat kuvion pinta-alan pienetessä. Onko kuvion pinta-alalle olemassa jokin alaraja, jota pienemmillä kuvioilla laskenta ei enää anna luotettavia tuloksia? Ajouraverkostosta laskettiin seuraavat kuviokohtaiset ajouratunnukset:

- Kokonaispituus (m) ja pituus pinta-alayksikköä kohti (m/ha),
- Keskimääräinen ajouraväli (m),
- Ajourien pinta-alan osuus kuvion pinta-alasta käyttäen ajourille oletusleveyyttä.

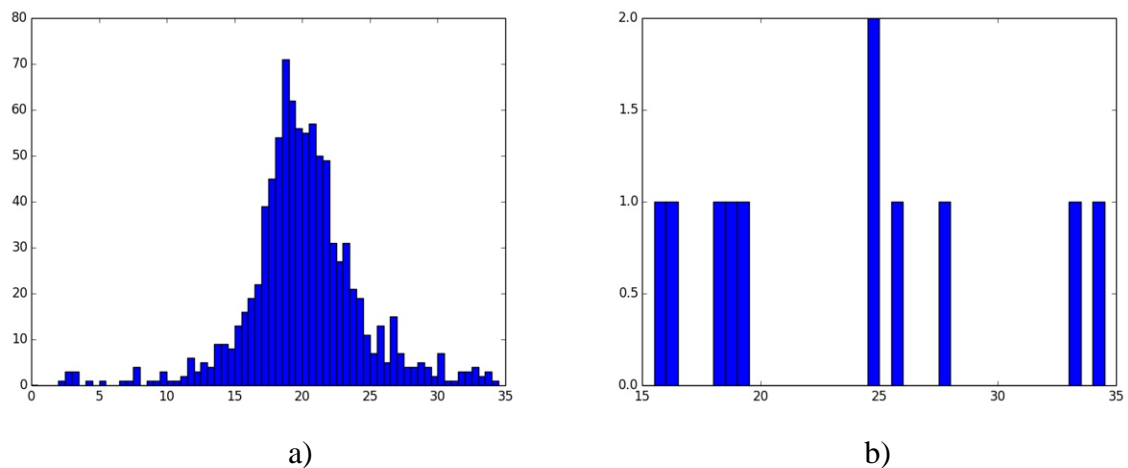
Kokonaispituus saatiin laskemalla paikkatieto-ohjelmassa pituus hakkuukonetiedoista tuotetulle ajourien vektorimuotoiselle verkostolle. Verkoston pituus voitiin määrittää yksikäsitteisesti, koska siinä ei huomioida edestakaisia ajokertoja, joita hakkuukoneelle usein kertyy korjuutyön aikana. Kuviokohtainen ajouraverkoston pituus pinta-alayksikköä kohti laskettiin suhteuttamalla ajouraverkoston kokonaispituus kuvion pinta-alaan (pinta-alaan suhteutetusta uraverkoston pituudesta (m/ha) käytetään termiä *uratiheys*). Ajourien pinta-alaosuus saatiin kokonaispituuden avulla käyttäen suosituksena olevaa tavoitearvoa ajouraleveydelle kivennäismaalla, mikä on 4,5 metriä (Ovaskainen 2019).

Laskennallisesti tuotettu ajouraverkosto koostuu päistään yhteen liitetystä janoista. Keskimääräinen ajouraväli määritettiin luomalla kuviolla olevalle ajouraverkostolle näytteistyskohdat, joista jokaiselle määritettiin kohtisuora etäisyys viereiselle ajouralle (Kuva 20a). Näytteistys kattoi koko kuviolla olevan ajouraverkoston. Hyväksyttävälle ajouravälihavainnoille annettiin maksimiarvo (35 metriä), jotta esimerkiksi kauempana olevia kuvion eri osien ajouria ei tulkittaisi vierekkäisiksi uriksi. Jos molemmilla puolilla oli ajoura, urien etäisyyksistä laskettiin keskiarvo. Uravälilaskenta ei huomioinut niitä näytteistyskohtia, joissa verkoston jana liittyi vähintään kahteen muuhun janaan (Kuva 20b). Tällä varmistettiin, ettei laskentaan tule mukaen risteyskohtia, joissa ajourat ovat epätavallisen lähellä toisiaan eivätkä siten edusta todellista uraväliä ajouraverkostolla (Riekkimäki ym. 2019).



Kuva 20. **a)** Ajouraverkoston uravälin määrittäminen automaattiselle ajouralle. Näytteistyspiste punaisella, ja sivuilta kohtisuorasti löydetty, viereisten ajourien etäisyyden mittauspisteet keltaisella. **b)** Risteyshkohdat rajataan pois, koska ne eivät edusta todellista uraväliä verkostolla (Rieki ym. 2019).

Metsätehon kehittämä ajouravälilaskenta (Rieki ym. 2019) on perinteistä systemaattista koealamenetelmää kattavampi ja laskee uravälit huomattavasti tiheämmällä otannalla. Ajouratunnuksista voitiin muodostaa lisäksi histogrammit, joista oli helppo tarkastella ajouravälimittausten jakaumaa myös visuaalisesti (Kuva 21).



Kuva 21. **a)** Harvennushakkuulta melko tasaisesti jakautunut histogrammi, jossa ajouravälin keskiarvo on 20,1 metriä ja keskihajonta 4,36 metriä. Havaintojen määrä on 912 ja moodi 18,5 metriä. **b)** Liian vähän havaintoja (11) sisältävä avohakkuun histogrammi. Pienen kuvion analysoiminen on isoa kuviota epävarmempaa eikä anna tarpeeksi luotettavaa kuvaa kuvion ominaisuuksista.

Ajouratarkastelussa huomioitiin hakkuutavat ja verrattiin, olivatko ajouratunnukset esimerkiksi harvennuksilla erilaiset kuin päätehakkuilla. Päätehakkuilla käytettävän raskeamman hakkuukoneen on päästävä lähemmäksi painavaa puunrunkoa, kun taas harvennuksella kaadettavat pienet rungot voidaan kaataa myös kauempaa hakkuukoneesta

käyttäen puomia aina sen maksimiulottuvuuteen asti. Toisaalta päätehakkuilla ei välttämättä tarvitse noudattaa vanhoja ajouria, koska jäljelle jäävää puustoa ei tarvitse varoa. Ajouraväleille ja uratiheyksille laskettiin yhden sigman luottamusvälit kolmen yleisimmän hakkuutavan kuvioille yhtälöllä 1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{(n-1)}} \quad (1)$$

Luottamusväli kuvaa normaalijakautuneeksi oletetun aineiston keskihajontaa. Yhden sigman luottamusväli pitää sisällään aineiston kuvioista noin 68 %.

Ajouratunnusten selvittämisen lisäksi ajouraverkoston suureita verrattiin tilastollisesti kuvion muotoparametreihin. Muotoparametrin määrittämiseksi on kehitetty erilaisia matemaattisia funktioita, joilla kuvion muotoa voidaan verrata johonkin haluttuun, säännölliseen geometriseen muotoon. Forman & Godron (1986) ovat käyttäneet muotoparametreja maisematason mallinnuksessa. Tässä työssä kuvioille laskettiin muotoparametri erikseen suhteessa sekä neliö- että ympyrämuotoon käyttäen Forman & Godronin yhtälöitä 2 ja 3.

$$\text{neliö} : \frac{p}{(4 \times \sqrt{A})} \quad (2)$$

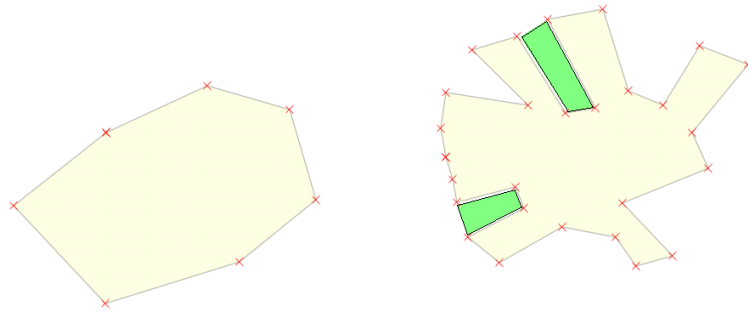
$$\text{ympyrä} : \frac{p}{(2 \times \sqrt{\pi \times A})} \quad (3)$$

(p = kuvion piiri, A = kuvion pinta-ala)

Ympyrän suhteen lasketun muotoparametrin arvo lähestyy ylhäältä päin arvoa 1 kuvion muodon lähestyessä ympyrän muotoa, mutta neliön suhteen lasketun muotoparametrin arvo voi olla myös alle 1. Muotoparametrin lisäksi kuvion muotoa tarkasteltiin muotoindeksillä, joka on kuvion piiri jaettuna pinta-alalla.

Ajouraverkostosta tarkasteltiin myös, miten ajourien määrän käy suhteessa kuvion pinta-alaan, jos kuvion ympärystymitta, piiri, muuttuu suhteessa kuvion kokoon. Toisin sanoen, muuttaako kuvion epäsäännöllinen muoto ajourien suhteellista määrää suoraan ajourien sijoittamisen kautta tai välillisesti esimerkiksi kuvion automaattisessa rajauksessa tapahtuvien virheiden kautta. Jos kuvio on muodoltaan konkaavi ja siinä on paljon erimuotoisia pistoja ulospäin, kuvion piiri kasvaa huomattavasti suhteessa kuvion pinta-alaan.

Automaattinen kuviorajaus saattaa tasoittaa nämä pistojen väliin jäävät lahdekkeet osaksi kuviota, vaikka niissä ei olisi tehty toimenpiteitä (Kuvassa 22 vihreällä).



Kuva 22. Vasemmanpuoleinen kuvio on konveksi (kaikki kulmat  $<180^\circ$ ), oikeanpuoleisessa on yli  $180^\circ$ :n kulmia, joten kuvio on konkaavi. Kuvioiden pinta-alat ovat yhtä suuret, mutta konkaavin kuvion piirin pituus on liki kaksinkertainen konvekseen verrattuna (konveksin kuvion piiri on noin 52 % konkaavin kuvion piiristä). Etenkin vihreällä merkityt kuvion ulkopuoliset alueet voivat päätyä automaattisessa kuvionmuodostuksessa kuvioon kuuluviksi.

Automaattisen ajouralaskennan lisäksi jäljiteltiin Metsäkeskuksen maastossa tehtävää ajouravälimittausta (jatkossa *simulointi*). Simuloinnissa kuviolle muodostettiin systemaattinen näytteistys käyttäen näytepisteiden linjana kuvion pisintä akselia Metsäkeskuksen koealamaastomittauksen tavoin. Tavoite oli saada kymmenen näytettä kuviota kohti vähintään kahdesta eri ajouravälistä. Jos kymmentä näytepistettä ei saatu kuvion pääakselille, niitä pyrittiin lisäämään satunnaisesti pääakselin ulkopuolelle samalla näytteistystiheydellä. Näytepisteistä mitattiin keskimääräinen ajouraväli samoin periaattein kuin kuvassa 2 sivulla 14. Näytteistysuoran kulmia rajoitettiin sekä pääakseliin että sivulla oleviin ajouriin nähden, jotta havaintojen edustavuus säilyi. Myös ajouraverkoston risteyskohdat ja kuvion reuna-alueet jätettiin pois näytteistyksestä.

Simuloimalla mitattujen ajouraväliarvojen avulla laskettiin kuviokohtaiset keskimääräiset ajouravälit. Lisäksi tulostietoihin tallennettiin onnistuneesti mitattujen uravälihavaintojen määrä. Tuloksia verrattiin automaattisesti tuotetuilta ajouraverkostoilta laskettuihin ajouraväleihin. Simuloituja ja automaattisesti tuotettuja ajouravälejä verrattiin ajouravälien suhdeluvulla, joka saatiin jakamalla simuloitu ajouravälin arvo automaattisen ajouravälin arvolla. Suhdeluvun ollessa suurempi kuin 1 simuloitu ajouraväli on automaattista ajouraväliä suurempi.

### 3 TULOKSET

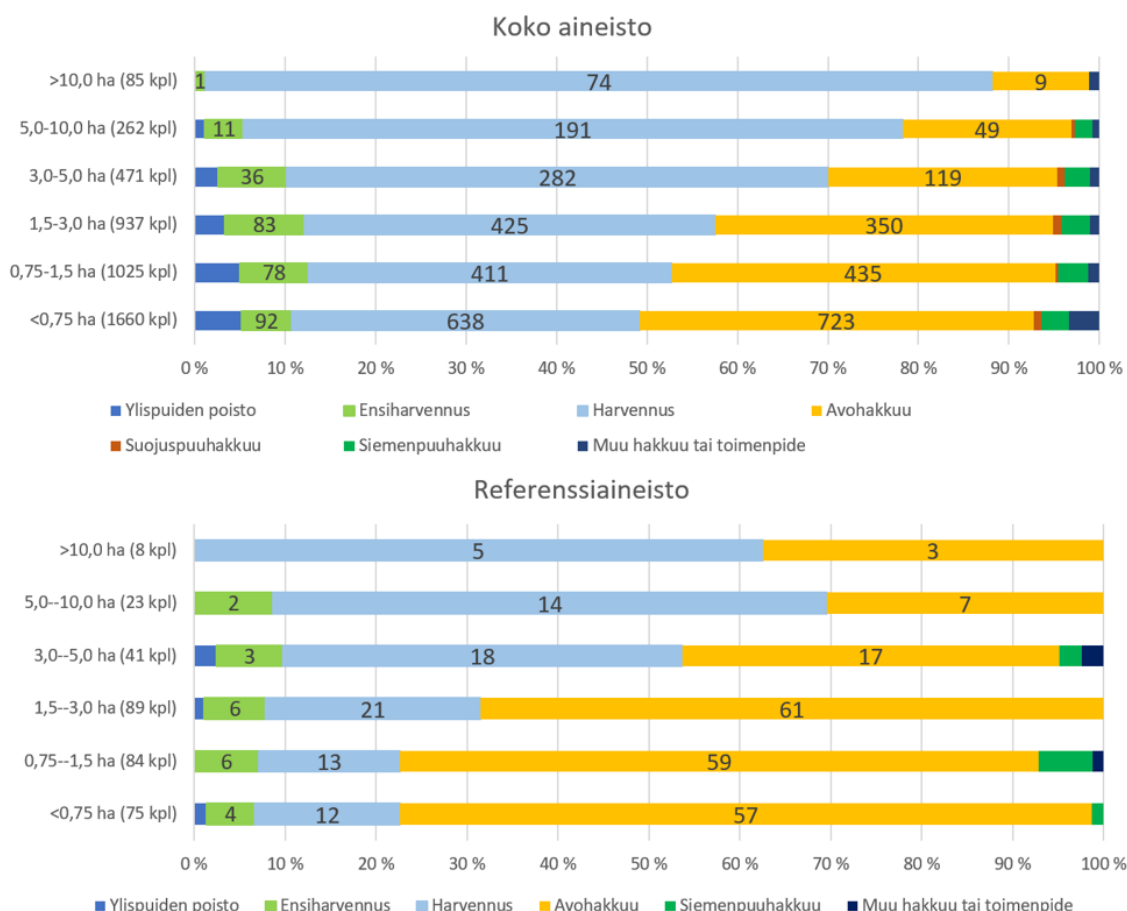
Tulosten tarkastelussa koko aineisto jaettiin kuuteen eri pinta-alaluokkaan: alle 0,75; 0,75–1,5; 1,5–3,0; 3,0–5,0; 5,0–10,0 ja yli 10 ha. Luokittelussa pienet alle 0,75 hehtaarin kuviot eroteltiin omaksi erilliseksi luokakseen. Pienten kuvioiden tarkastelu erikseen oli tärkeää, koska niissä esimerkiksi ajouratunnusten vaihtelu oli huomattavasti keskimääräistä suurempaa sekä hakkuukonekuvioiden ja referenssikuvioiden erot suhteellisesti suurempia. Suuret, yli 5 hehtaarin kuviot puolestaan edustivat kuviokoon yläpäättä, ja niiden lukumäärä Suomen yksityismetsissä on verrattain pieni. Tyypillinen hakkuu-aikomus-kuvion pinta-ala Suomen yksityismetsissä vuonna 2019 oli tilastojen mukaan keskimäärin 1,5–2 hehtaaria harvennuksilla ja hieman alle 1,5 hehtaaria avohakkuilla (Metsäkeskus 2021). Tilastot perustuvat metsäkäyttöilmoituksiin.

#### 3.1 Kuvioiden vertailu

Kuvioiden vertailussa tarkasteltiin kuvioiden jakaantumista hakkuutapoihin ja pinta-alaluokkiin sekä koko aineistossa että referenssiaineistossa. Referenssiaineiston kuviot olivat keskimäärin koko aineiston kuvioita suurempia. Referenssikuvioiden keskipinta-ala oli 2,35 ja koko aineiston kuvioiden 1,93 ha. Kuvioiden jakautuminen hakkuutapojen mukaan referenssiaineistossa vaihteli hieman verrattaessa koko aineistoon. Ensiharvennusten osuus pysyi melkein samana sekä koko aineistossa (6,8 %) että referenssiaineistossa (6,6 %). Harvennushakkuiden osuus koko aineistossa oli puolestaan paljon suurempi (45,5 %) kuin niiden osuus referenssiaineistossa (25,9 %). Avohakkuiden osuus puolestaan nousi koko aineiston 38,0 prosentista referenssiaineiston 63,8 prosenttiin. Koko aineiston kohdalla muiden hakkuutapojen osuus (9,8 %) laski selvästi referenssiaineiston osuuteen (3,8 %) verrattuna. Tämä johtuu siitä, että yksiselitteisen referenssikuvion rajaaminen onnistui vain selkeärajaisimmille kuvioille.

Eri hakkuutavat jakautuivat tasaisesti pinta-alan suhteen sekä koko aineistossa että referenssiaineistossa (Kuva 23). Harvennusten osuus aineistoissa kasvoi kuvioiden pinta-alan suurentuessa lukuun ottamatta yli 10 hehtaarin referenssikuvioita. Avohakkuiden osuus vastaavasti pieneni tasaisesti etenkin koko aineiston kohdalla. Referenssiaineiston osalta ylispuiden poistot, suojus- ja siemenpuuhakkuut sekä muut hakkuut olivat huomattavasti vähäisempiä verrattaessa koko aineistoon, koska kyseiset hakkuutavat suodattuivat pois

aineistosta jo digitointivaiheessa. Referenssikuvioiden kokojakauma edusti koko aineistoa erinomaisesti etenkin kolmen yleisimmän hakkuutavan kohdalla, mikä on olennaista tutkimuksen kannalta.



Kuva 23. Kertymäkuvaaja hakkuutapojen jakautumisesta pinta-alaluokittain koko aineistossa ja referenssiaineistossa. Koko aineiston kuvioiden määrä on 4 440 ja referenssikuvioiden 320. Referenssiaineisto on luokiteltu referenssikuvioiden pinta-alan mukaan. Kuvaajassa kolmen yleisimmän hakkuutavan kuviomäärät.

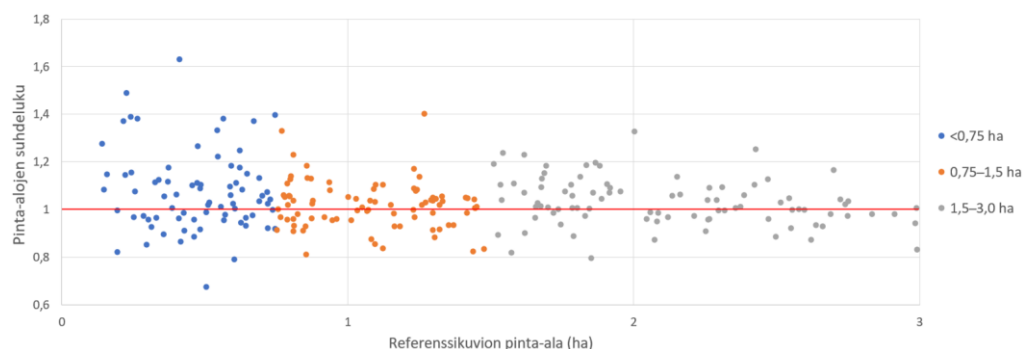
Kaikista 320 referenssikuvioista kolmen yleisimmän hakkuutavan osuus oli 308 kuviota eli 96 % kuvioista. Muut hakkuutavat -ryhmä koostui 12 kuviosta: kolme ylispuiden poistoa, seitsemän siemenpuuhakkuuta sekä kaksi muuta hakkuuta tai toimenpidettä. Referenssiaineisto, kuten koko hakkuukonekuvioiden aineistokin, sisälsi määrällisesti eniten pieniä kuvioita. Alle 1,5 hehtaarin kuvioita oli referenssiaineistosta liki puolet, 159 kpl. Alle 3 hehtaarin kuviot (248 kpl) käsittivät aineistosta 78 %, kun taas kaksi yleisintä kokoluokkaa referenssiaineistossa, 0,75–1,5 ja 1,5–3,0 hehtaaria (173 kpl), käsittivät referenssiaineistosta 54 prosenttia. Yleisimpien kokoluokkien kuviokoot edustivat hyvin tyyppillistä suomalaisen yksityismetsätilan kuviokokoa.

### 3.1.1 Kuvioiden pinta-alan osuvuus

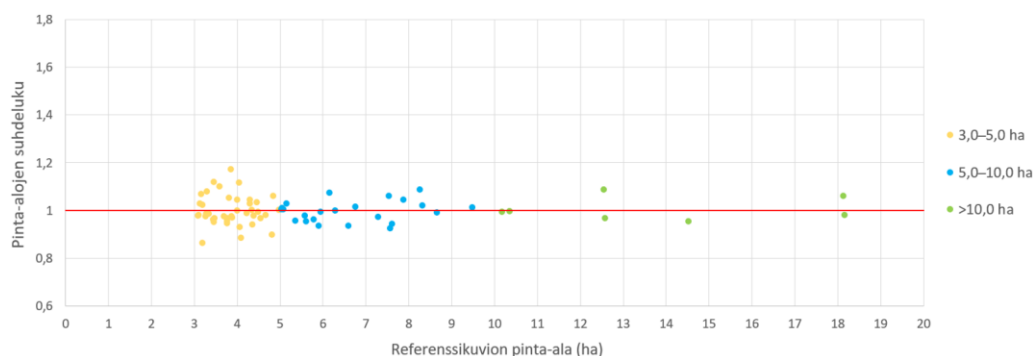
Hakkuukonekuviot olivat yleensä hieman referenssikuvioita suurempia, sillä kaikkien kuvioiden pinta-alojen suhdelukujen keskiarvo oli 1,03 (Taulukko 4). Referenssiaineiston 320 kuviosta kaikkiaan 182 kuviota (57 %) oli sellaisia, joissa hakkuukonekuvion pinta-ala oli referenssikuvion pinta-alaa suurempi. Vastaavasti kuvioita, joissa referenssikuvio oli hakkuukonekuviota suurempi, oli 138 kpl (43 %). Pinta-alojen suhdeluku oli pienillä kuvioilla (alle 0,75 ha) melko suuri, 1,08, mutta pieneni huomattavasti yli 0,75 hehtaarin kuvioilla. Luokassa 3,0–5,0 ha hakkuukonekuviot olivat likimain samansuuruisia referensseihin nähden ja luokassa 5,0–10,0 ha hakkuukonekuviot olivat jopa aavistuksen verran referenssikuvioita pienempiä. Pinta-alojen suhdeluvut on esitetty graafisesti kuvassa 24.

Taulukko 4. Hakkuukonekuvioiden keskimääräiset pinta-alojen suhdeluvut kokoluokittain.

Kokoluokka (ha)	<0,75	0,75–1,5	1,5–3,0	3,0–5,0	5,0–10,0	>10,0	Referenssiaineisto
Pinta-alojen suhdeluku	1,075	1,018	1,030	1,001	0,997	1,009	1,031



a)



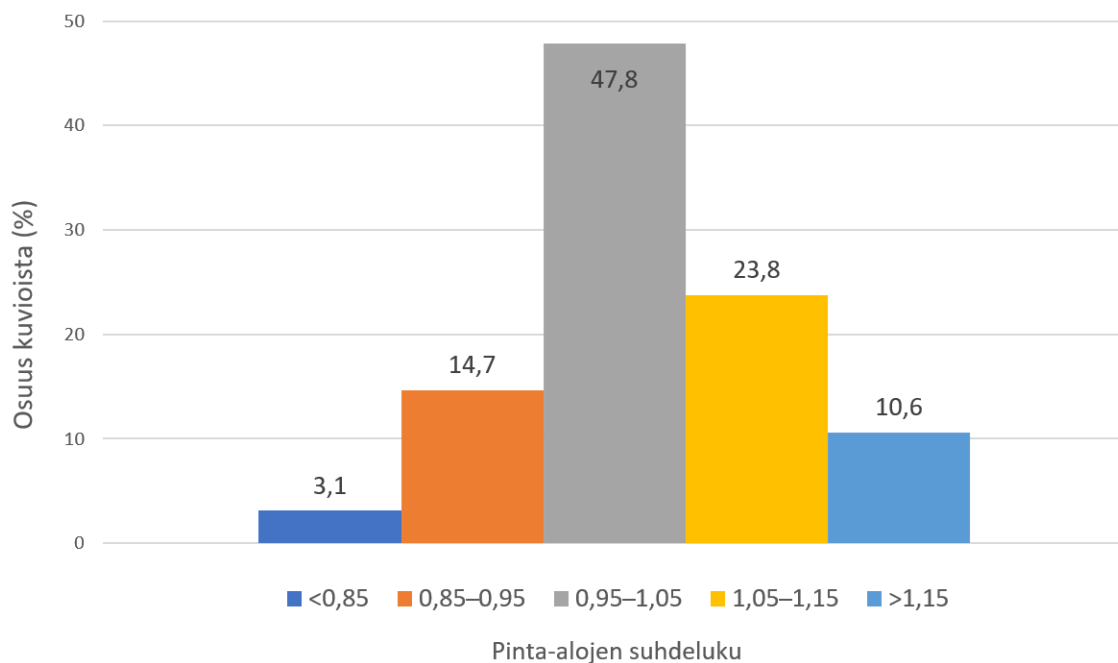
b)

Kuva 24. Pinta-alojen suhdeluvut referenssikuvioiden pinta-alojen funktiona. Punaisen viivan yläpuolella olevilla pisteillä hakkuukonekuvio on ollut referenssikuviota suurempi. **a)** Pinta-alojen suhdeluvut alle 3 hehtaarin kuvioilla. **b)** Pinta-alojen suhdeluvut yli 3 hehtaarin kuvioilla. Kuvaajan vaaka-akseli on tarkastelua varten rajattu 20 hehtaariin, mikä jättää kuvaajan ulkopuolelle 30,9 hehtaarin harvennuskuvion, jonka pinta-alojen suhdeluku on 1,026 (ks. kuva 51 s. 69).



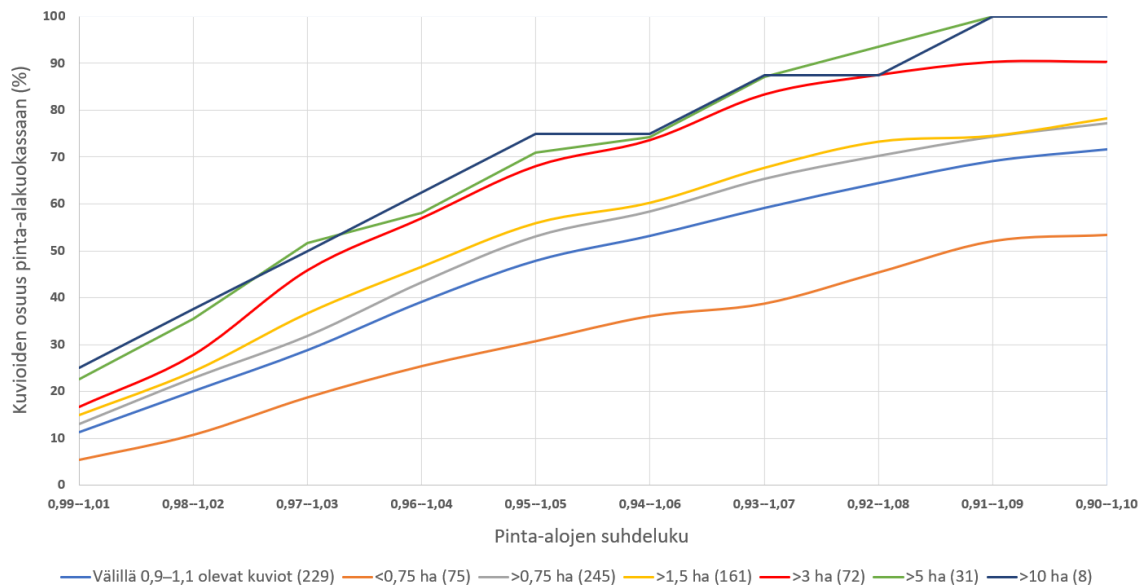
Referenssiaineistossa pinta-alojen suhdeluvuissa oli melko paljon vaihtelua. Vaihtelu oli suurinta pienten kuvioiden kohdalla, mikä näkyy pisteparven voimakkaana hajaantumisenä kuvan 24a vasemmassa reunassa. Pienillä kuvioilla hakkuukonekuvio oli yleensä selvästi referenssikuviota suurempi (pisteet punaisen viivan yläpuolella). Pinta-alaluokittaisesta tarkastelusta selviää, että referenssikuvioiden pinta-alavastaavuus keskimäärin parani kuvioiden pinta-alan kasvaessa. Kun kuvioiden pinta-ala kasvoi, pinta-alojen suhteelliset arvot alkoivat lähestyä arvoa 1, jolloin kuviot olisivat yhtä suuret. Erityisesti yli 5 hehtaarin kokoisilla kuvioilla pinta-alojen suhdeluvut olivat lähellä arvoa 1.

Referenssiaineiston kuvioista noin kolmasosalla (34 %) pinta-alojen suhdeluku oli yli 1,05, mikä tarkoittaa, että hakkuukonekuvio oli yli 5 % referenssikuviota suurempi. Liki puolella (48 %) aineiston kuvioista pinta-alojen suhdeluku oli välillä 0,95–1,05, ja 18 % kuvioista oli sellaisia, joissa pinta-alojen suhdeluku oli pienempi kuin 0,95 (Kuva 25).



Kuva 25. Pinta-alojen suhdelukujen jakauma referenssiaineistossa.

Hakkuukonekuvioiden pinta-alojen vaihtelua referensseihin nähden kuvaa myös pinta-alojen suhdelukujen kertymäfunktio (Kuva 26). Kaikista kuvioista vain 11 prosentilla pinta-alojen suhdeluku oli välillä 0,99–1,01. Esimerkiksi yli 0,75 hehtaarin kuvioista 43 prosentilla pinta-alojen suhdeluku on välillä 0,96–1,04.

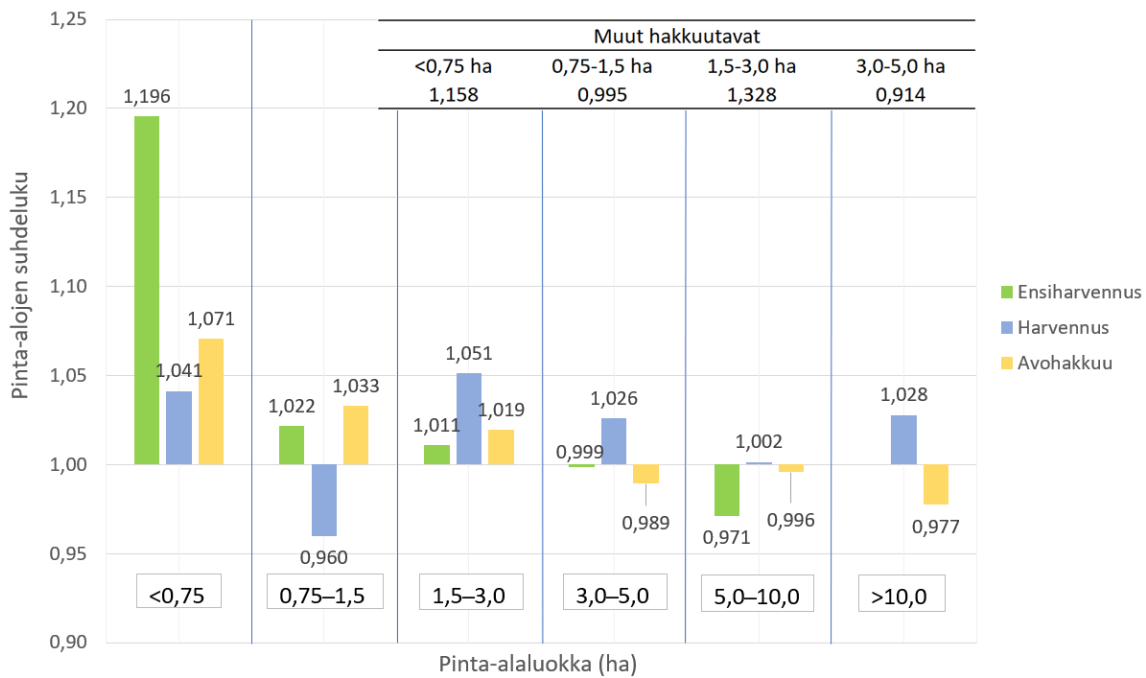


Kuva 26. Kuvaajassa on pinta-alojen suhdelukujen kertymäfunktio eri pinta-alaluokissa. Kuvaajan X-akselilla on pinta-alojen suhdeluvun tarkasteluväli, joka kasvaa tavoitearvon (1) molemmiin puolin, kun kertymää lasketaan. Kuvaajan Y-akselilla on kertymäprosentti kuvien osuudesta kussakin pinta-alaluokassa. Sininen käyrä (229 kuviota) kuvaa kaikkien niiden hakkuukonekuvien osuutta, joiden pinta-alojen suhdeluku on välillä 0,9–1,1. Kuvaajasta puuttuvat referenssiaineiston 91 kuviota, joiden pinta-alojen suhdeluku on joko alle 0,9 tai yli 1,1.

Referenssivertailun hakkuukonekuvien tunnuksien hakkuutavoittain on esitelty taulukossa 5. Hakkuutavoittain lasketuissa keskimääräisissä pinta-alojen suhdeluvuissa ei ole kovin merkittäviä eroja. Pinta-alojen suhdelukujen keskiarvot laskettiin hakkuutavoittain myös kuvien kokoluokittain (Kuva 27). Harvennuksilla ja avohakkuilla pinta-alojen suhdeluvut olivat melko samankaltaisia kaikissa pinta-alaluokissa. Ensiharvennuksilla hakkuukonekuvien olivat selvästi referenssikuvioita suurempia alle 0,75 hehtaarin luokassa (pinta-alojen suhdeluku noin 1,20), mutta ero tasoittui suuremmilla kuvioilla. Myös alle 0,75 hehtaarin avohakkuiden sekä 1,5–3,0 hehtaarin harvennuksilla kuvien keskimääräinen pinta-alojen suhdeluku oli suurempi kuin 1,05.

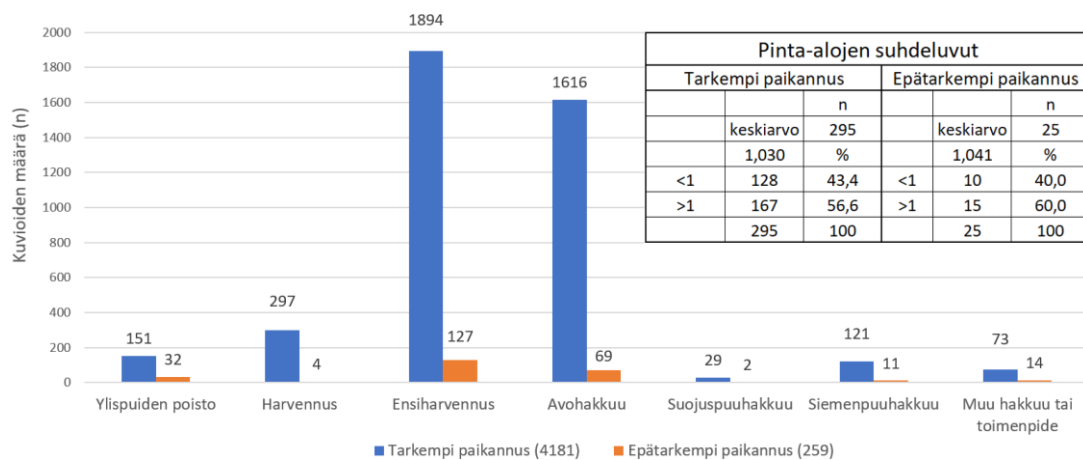
Taulukko 5. Referenssivertailun hakkuukonekuvien tunnuksien hakkuutavoittain.

Hakkuutapa	n	Pinta-alojen suhdelukujen keskiarvo	Pinta-alojen vaihteluväli (ha)	Pinta-alojen keskiarvo (ha)	Pinta-alojen mediaani (ha)	Pinta-alojen keskihajonta (ha)	Pinta-alojen suhdelukujen keskihajonta
Ensiharvennus	21	1,044	0,46–5,89	2,1	1,7	1,6	0,149
Harvennus	83	1,020	0,15–30,91	3,8	2,6	4,4	0,119
Avohakkuu	204	1,034	0,14–18,16	1,8	1,3	2,1	0,106
Muut hakkuutavat	12	1,030	0,75–4,80	1,8	1,3	1,3	0,162
Kaikki	320	1,031	0,14–30,91	2,4	1,5	3,0	0,115



Kuva 27. Pinta-alojen suhdeluvut hakkuutavoittain ja kokoluokittain. Yli 3 hehtaarin avohakkuukuvioilla arvo on alle yhden, mikä tarkoittaa, että referenssikuviot ovat hakkuukonekuvioita suurempia. Kuvaajassa ovat ainoastaan kolmen yleisimmän hakkuutavan arvot. Muut hakkuutavat ovat eriteltynä kokoluokittain taulukossa. Yli 10 hehtaarin luokassa ei ollut ensiharvennuksia, mikä johtunee todennäköisesti ensiharvennusten pienestä kokonaismäärästä (Taulukko 5).

GNSS-laitteiston laskennallisesti määritetty paikannustarkkuus vaihteli hieman aineiston sisällä (Kuva 28). Referenssivertailun kuvioista 295 oli hakattu tarkemman GNSS-paikannuksen hakkuukoneilla, mikä on 92 % referenssiaineistosta. Vastaavasti epätarkemman GNSS-paikannuksen hakkuukoneiden tiedoista muodostettuja hakkuukonekuvioita oli 25 kuvioita eli 8 %. Koko aineistossa tarkemman paikannuksen osuus oli 94 % ja epätarkemman paikannuksen puolesta 6 % kuvioista.

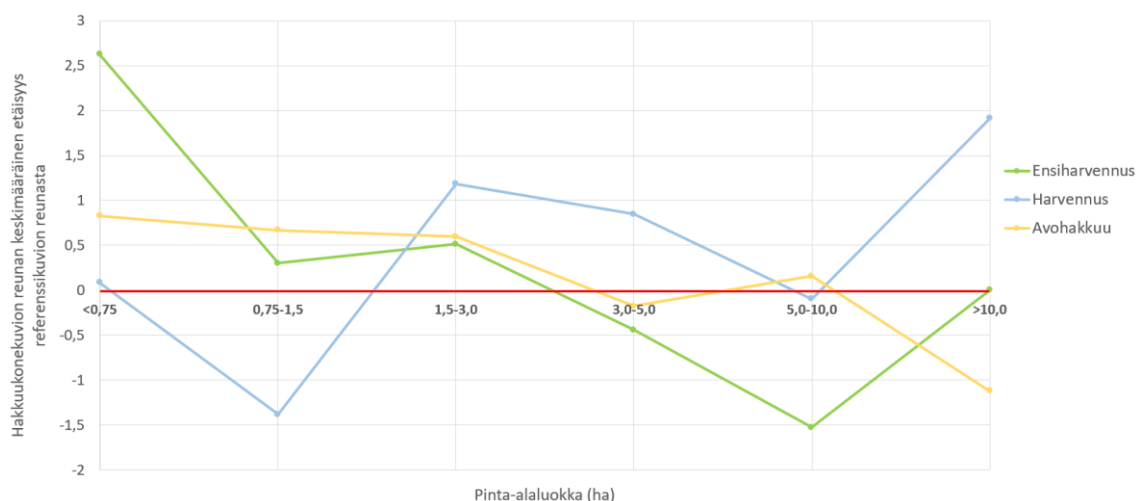


Kuva 28. Koko aineiston kuviot GNSS-paikannustarkkuuden mukaan. Taulukossa referenssivertailun kuvioiden tarkastelu paikannustarkkuuden mukaan. Sarake ”keskiarvo” on pinta-alojen suhdelukujen keskiarvo. Rivillä ”>1” on niiden kuvioiden määrä, joissa hakkuukonekuvio on referenssikuvioita suurempi.

Epätarkemman paikannuksen aineiston määrä jäi siis kokonaisuutena pieneksi, joten sen vaikutusta pinta-alojen suhdelukuihin ei pystytty arvioimaan yksityiskohtaisesti. Kuvan 28 eri paikannustarkkuuden tuloksilla ei kuitenkaan ollut tilastollista merkitsevyyttä, eli hakkuukoneen GNSS-paikannustarkkuus ei näytä aiheuttavan merkittäviä eroja kuvioiden pinta-alojen suhdelukuihin. Kuviot olivat molemmilla paikannustarkkuuksilla referenssejä hieman suurempia, kuten koko referenssivertailun aineistossakin.

### 3.1.2 Kuvioiden sijainnin osuvuus

Kuvioiden sijainnin osuvuutta tutkittiin laskemalla vertailtavien kuvioiden reunojen etäisyyksiä toisistaan. Kaikkien kuvioiden keskimääräinen reunaetäisyys oli +0,5 metriä, mikä tarkoittaa, että hakkuukonekuvioiden reuna on keskimäärin ollut hieman referenssikuvioiden reunan ulkopuolella. Yksittäisten kuvioiden keskimääräiset reunaetäisyydet vaihtelivat välillä -6,8–9,2 m. Kuvioista 55 % oli sellaisia, joilla keskimääräisen reunaetäisyyden arvo oli positiivinen. Vastaavasti negatiivisen arvon sai 45 % kuvioista. Keskimääräinen reunaetäisyys vaihteli hakkuutavan ja pinta-alaluokan mukaan. Harvennuksilla hakkuukonekuvion reunat siirtyivät keskimäärin referenssikuvion reunan ulkopuolelle kuvion pinta-alan kasvaessa, ensiharvennuksilla ja avohakkuilla kävi päinvastoin (Kuva 29).



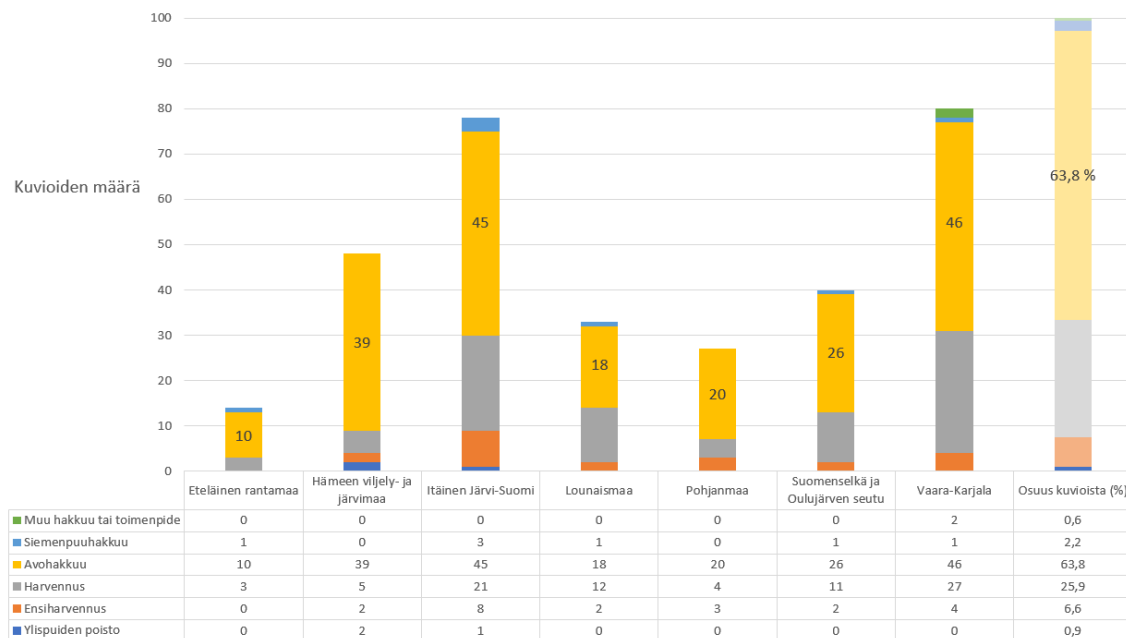
Kuva 29. Hakkuukonekuvioiden reunojen keskimääräiset etäisyydet referenssikuvioiden reunoista pinta-alaluokittain ja hakkuutavoittain. Positiivinen arvo tarkoittaa, että hakkuukonekuvion reuna on keskimäärin ollut enemmän referenssikuvion reunan ulkopuolella.

Kuviokohtaisten pää- ja sivuilmansuuntaisten siirtymien vaihteluvälit olivat suuria, mutta keskiarvot pieniä. Pohjois-eteläsuunnassa vaihteluväli oli -16,1–31,0 m, keskiarvo 0,3 m,

itä-länsisuunnassa -16,8–17,5 m, keskiarvo 0,8 m, koillis-lounassuunnassa -15,8–22,7 m, keskiarvo 1,1 m ja kaakkois-luodesuunnassa -26,2–17,0 m, keskiarvo 0,2 m.

### 3.1.3 Kuvioden osuvuus maisemamaakunnittain

Maisemamaakunnan vaikutusta kuvioden osuvuuteen tarkasteltiin hakkuutapakohtaisesti. Hämeen viljely- ja järvimaan sekä Pohjanmaan kuviot kattoivat referenssikuvioista noin puolet. Suomenselän ja Oulujärvenseudulla hakkuukonekuvioden pinta-alat vastasivat parhaiten referenssikuvioden aloja, niiden pinta-alojen suhdeluku oli keskimäärin 1,002. Maisemamaakunnittain avohakkuu oli vallitseva hakkuutapa käsittäen noin 64 prosenttia kaikista kuvioista (Kuva 30 ja Taulukko 6).



Kuva 30. Referenssikuvioden jakautuminen eri hakkuutavoittain maisemamaakunnissa.

Taulukko 6. Maisemamaakunnat. Referenssiaineiston kuviot sijoittuvat seitsemään eri maisemamaakuntaan, joista liki puolet Hämeen viljely- ja järvimailla sekä Pohjanmaalla.

Maisemamaakunta	Kuvioden määrä	Osuus kuvioista (%)	Pinta-alojen suhdelukujen keskiarvo	Referenssikuvioden pinta-alojen keskiarvo (ha)	Referenssikuvioden pinta-alojen mediaani (ha)	Referenssikuvioden pinta-alojen keskihajonta (ha)
Eteläinen rantamaa	14	4,4	1,056	1,6	1,1	1,4
Hämeen viljely- ja järvimaa	78	24,4	1,062	2,3	1,7	2,5
Itäinen Järvi-Suomi	33	10,3	1,007	2,7	1,4	3,1
Lounaismaa	48	15,0	1,051	2,1	1,2	4,4
Pohjanmaa	80	25,0	1,005	2,6	1,8	2,9
Suomenselkä ja Oulujärven seutu	40	12,5	1,002	2,7	1,8	2,7
Vaara-Karjala	27	8,4	1,041	1,5	1,2	1,3
Kaikki	320	100,0	1,031	2,4	1,5	3,0

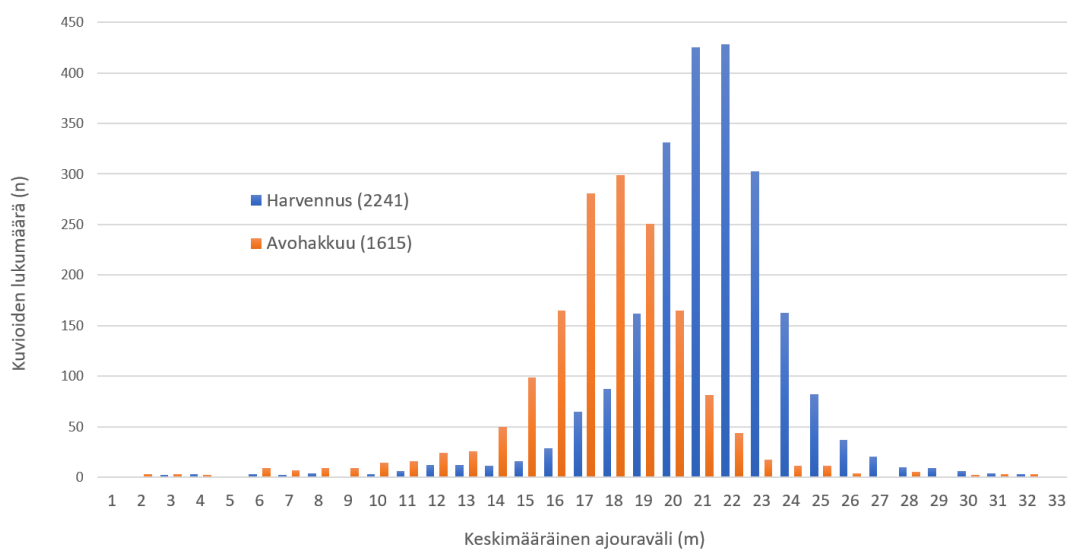
Maisemamaakunta-kohtaiset pinta-alojen suhdelukujen kuvaajat on esitetty liitteessä 2. Kaikissa maisemamaakunnissa tulokset olivat yleisesti hyvin samankaltaisia keskenään, sekä pinta-alojen suhdelukujen että hakkuutapojen jakautumisen osalta.

## 3.2 Ajourat

### 3.2.1 Keskimääräiset ajouravälit ja uratiheydet

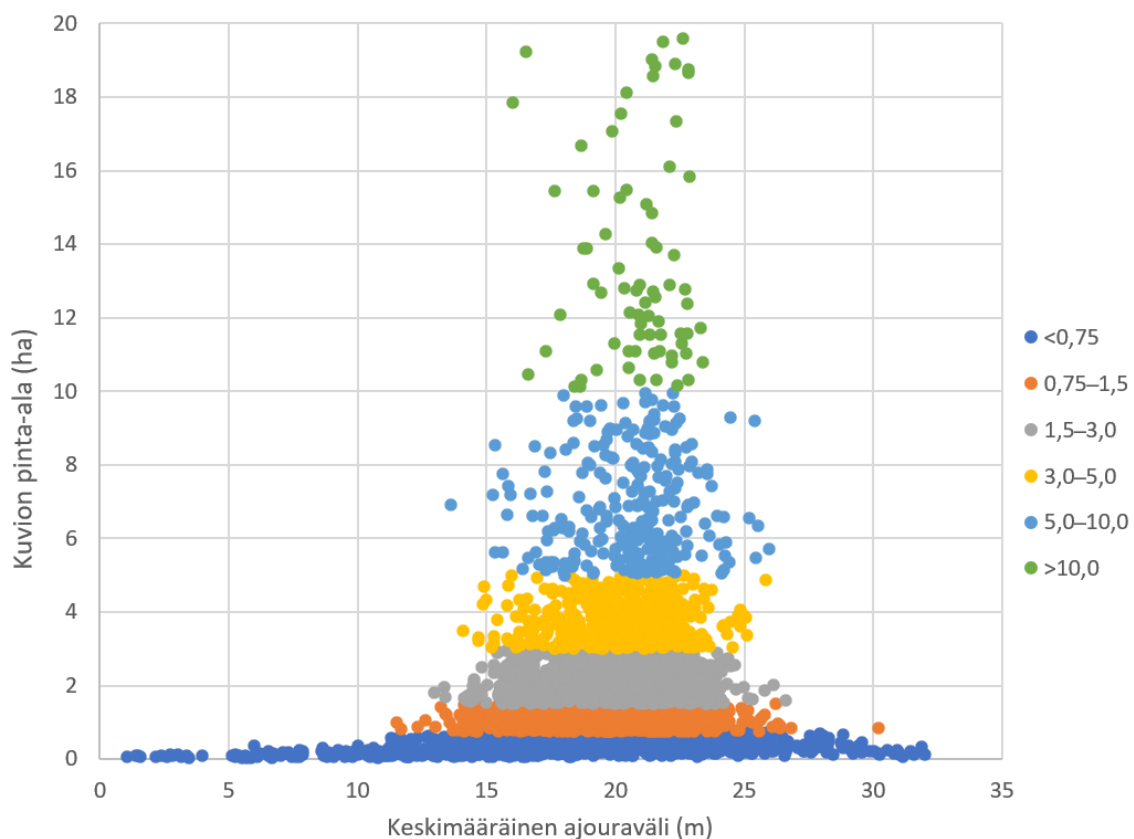
Kuvion kattava, automaattinen ajouraverkosto saatiin muodostetuksi koko aineistosta kaikkiaan 4 426 kuviolle. Näistä automaattinen ajouraväli laskettiin 4 258 kuviolle, joista kolmen yleisimmän hakkuutavan kuvioita oli 3 856 kpl. Kaikille kuviolle ei saatu laskettua ajouravälejä. Tähän vaikuttivat muun muassa kuvioiden epäsäännöllinen muoto, liian hajanainen runkopisteiden sijainti ja vähäinen näytteistysmäärä. Ajourien pinta-alaprosentin lähempi tarkastelu jätettiin tekemättä, koska se korreloi melko suorasti ajouraverkoston kokonaispituuden kanssa eikä tuo ajouralaskennan validointiin juurikaan uutta merkittävää tietoa.

Koko ajoura-aineiston harvennuksilla ajouraväli oli keskimäärin selvästi suurempi kuin avohakkuilla (Kuva 31). Harvennushakkuilla keskimääräinen ajouraväli oli 20,7 metriä ja avohakkuilla 17,1 m. Tässä harvennuksiin sisältyvät sekä ensi- että myöhemmät harvennukset.



Kuva 31. Ajoura-aineiston keskimääräiset ajouravälit jaoteltuina yhden metrin luokkiin. Kuvaajassa ainoastaan avohakkuut ja harvennukset (harvennuksiin on laskettu sekä ensiharvennukset että harvennukset).

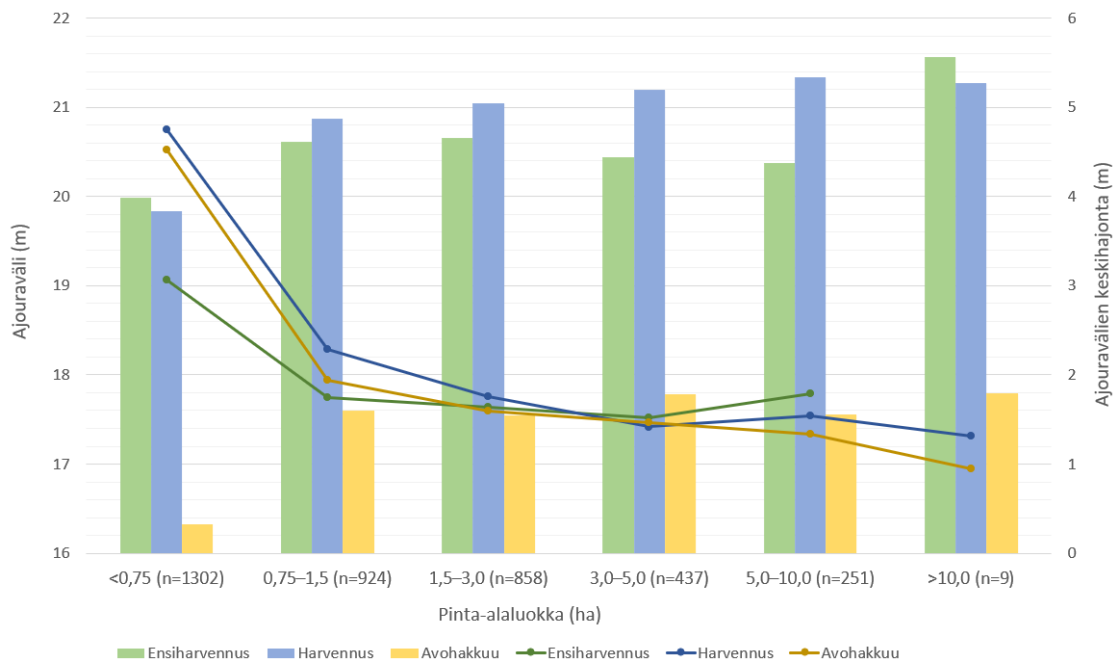
Ajouravälit kasvoivat kuvioden pinta-alan kasvaessa (Kuva 32). Alle 0,75 hehtaarin kuvioilla ajouraväli oli keskimäärin hieman yli 18 metriä. Alle 0,75 hehtaarin kuvioita oli kolmen yleisimmän hakkuutavan kuvioista 1 302 kpl. Ajouravälien vaihteluväli alle 0,75 hehtaarin kuvioilla oli 1,07–32,0 m. Pienten kuvioden suurta ajouravälien vaihtelua selittää kuvioden koko: kuvioille ei mahdu säännöllistä ajouraverkostoa, joten niillä ajouravälien vaihtelukin voi olla paljon suurempaa. Tästä syystä ajouramittauksia ei viiranomaisseurannassakaan tehdä alle 1 hehtaarin kuvioille. Vaihteluväli pieneni melko tasaisesti läpi aineiston kuvioden kasvaessa. Esimerkiksi 1,5–3,0 hehtaarin luokassa vaihteluväli oli enää 13,0–26,6 metriä ja uravälien keskiarvo 19,6 m.



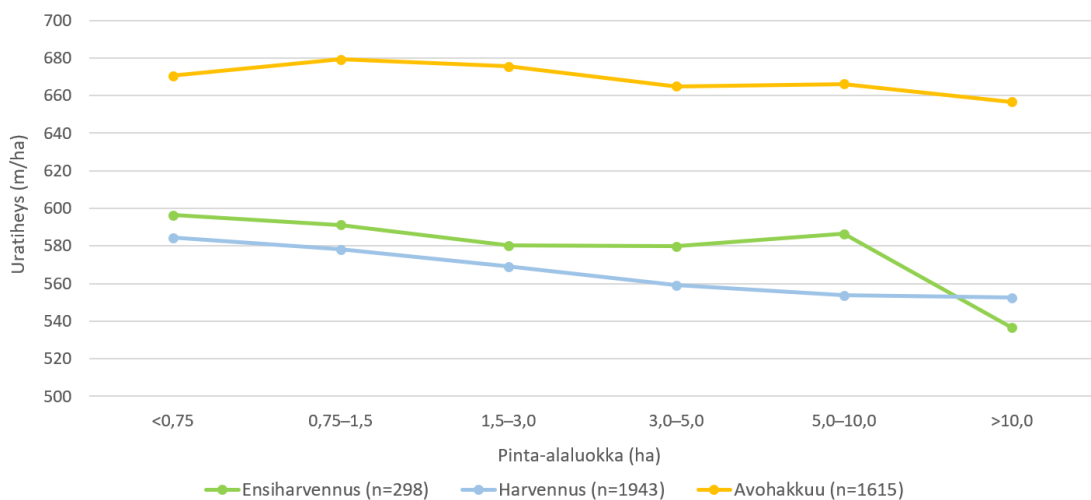
Kuva 32. Ajouravälien kehitys suhteessa kuvioden pinta-alaan kokoluokittain. Kaikkien kuvioden keskimääräinen ajouraväli on 19,2 m. Kuvaajasta puuttuvat yli 20 hehtaarin kuviot, joita on 10 kpl. Niiden keskimääräinen ajouraväli on 21,4 m ja ajourien vaihteluväli 20,4–25,3 m.

Kuvioilla, jotka oli käsitelty kolmella yleisimmällä hakkuutavalla, keskimääräiset ajouravälit levenivät isompiin kuvioihin mentäessä. Etenkin harvennuksilla uravälit kasvoivat melko suoraviivaisesti isompiin kuvioihin mentäessä. (Kuva 33). Vastaavasti uratiheys pieneni, koska uravälit ja uratiheys ovat toisiinsa nähden jokseenkin käänteisiä tunnuksia: mitä suuremmat uravälit, sen lyhyempi uraverkosto kuviolle muodostuu

(Kuva 34). Myöhemmillä harvennushakkuilla keskimääräiset uratiheydet olivat pienillä kuviolla noin 580 m/ha ja suurilla kuvioilla alle 560 m/ha. Ensiharvennuksilla vastaavat uratiheydet olivat pääosin harvennuksia hieman suurempia pysytellen kuitenkin alle 600 m:ssä/ha. Avohakkuilla uravälit olivat muita kuvioita kapeammat alle 0,75 hehtaarin kuvioilla, mutta yli 0,75 hehtaarin kuvioilla uravälit pysyivät suurin piirtein samanlaisina. Myös avohakkuilla uratiheyden kehitys menee käänteisesti uravälien kanssa: uratiheydet ”vakiintuvat” keskimäärin 650–675 metriin/ha uravälien jäädessä alle 18 metrin.



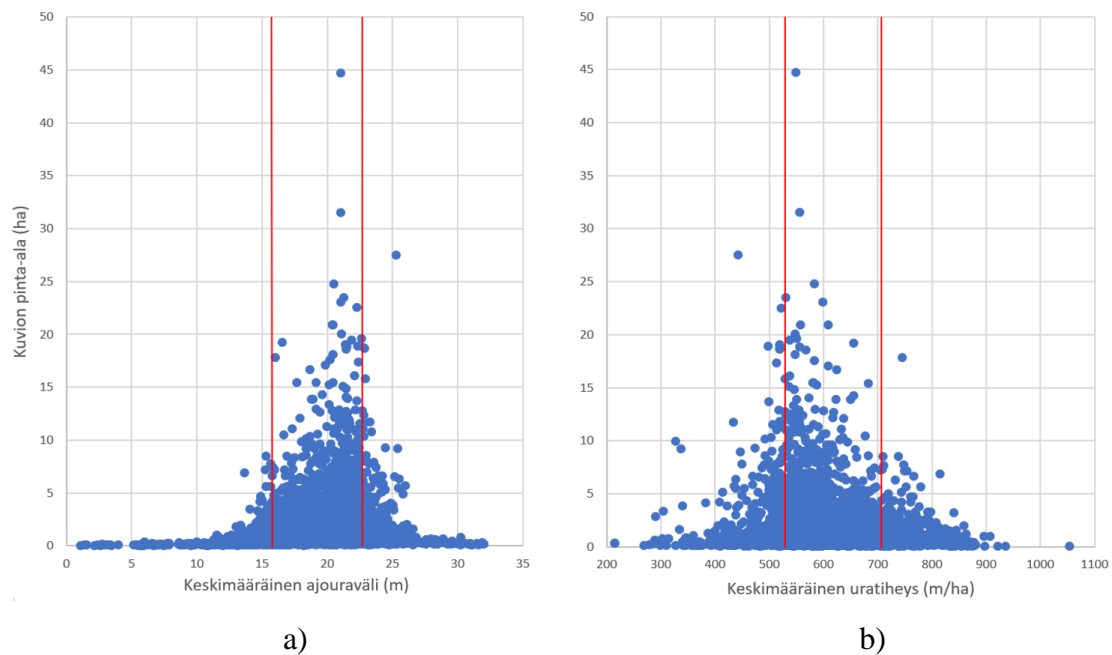
Kuva 33. Kolmen yleisimmän hakkuutavan kuviokohtaiset keskimääräiset ajouravälit (pylväät) ja niiden keskihajonnat (viivat) pinta-alaluokittain. Yli 10 hehtaarin ensiharvennuksia (vihreä viiva) oli vain yksi kuvio.



Kuva 34. Uratiheys pinta-alaluokittain ensiharvennuksilla, harvennuksilla ja avohakkuilla. Yli 10 hehtaarin ensiharvennuksia (vihreä) oli vain yksi kuvio.



Kuvioiden keskimääräisille ajouraväleille ja uratiheyksille laskettiin 68 prosentin eli yhden sigman luottamusväli yhtälöllä 1 käyttäen ajoura-aineiston kolmen yleisimmän hakkuutavan kuvioita (Kuva 35). Tällöin oletettiin, että aineiston arvot ovat normaalijakautuneet keskiarvon ympärille. Yhden sigman luottamusvälillä oli 2 633 kuviota aineiston 3 856 kuviosta. Niiden ajouravälien vaihteluväli oli 15,7–22,7 metriä, keskiarvo 19,2 m ja keskihajonta 3,5 m (Kuva 35a). Pienimmässä, alle 0,75 hehtaarin kokoluokassa kuviokohtaisen keskimääräisen ajouravälin vaihteluväli kasvoi huomattavasti, ja suurella osalla kokoluokan kuvioista ajouravälit olivat kaukana tavoitteellisesta 20 metristä.

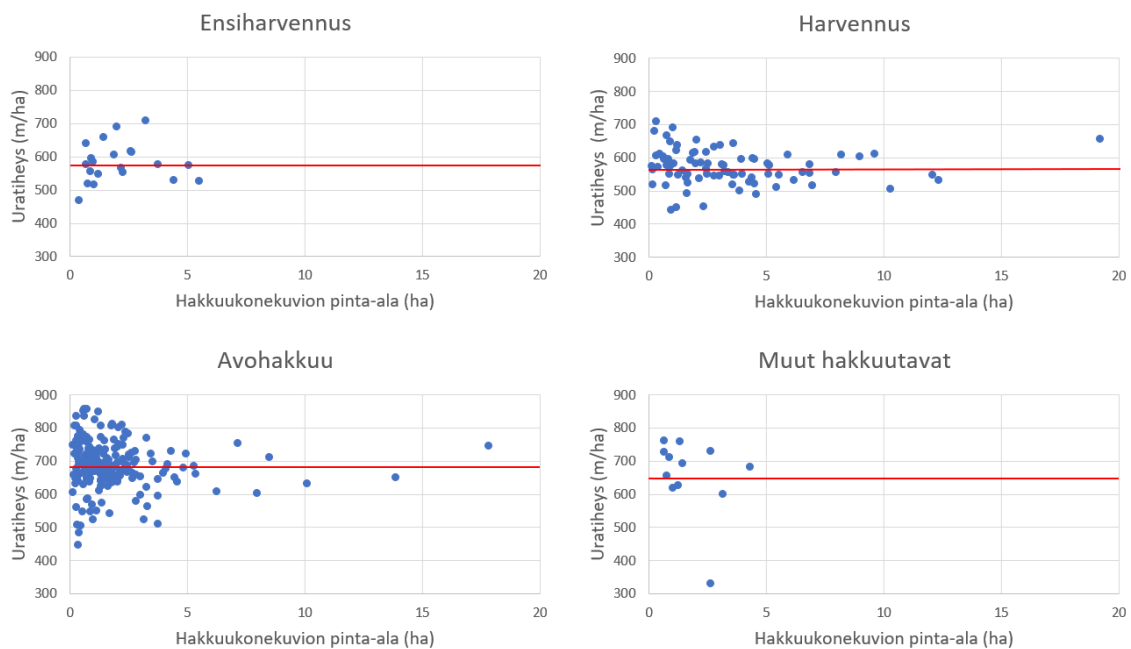


Kuva 35. Yhden sigman luottamusvälit ajouratunnuksille. Punaiset pystyviivat kuvaavat noin 68 prosentin luottamusväliä. **a)** Keskimääräinen ajouraväli on 19,17 metriä ja vaihteluväli 15,73–22,71 metriä. **b)** Keskimääräinen uratiheys on 616 m/ha ja vaihteluväli 528–704 m/ha.

Uratiheyksien (Kuva 35b) keskiarvo oli 616 m/ha, keskihajonta 88 m/ha ja vaihteluväli 528–704 m/ha. Uratiheyksien keskihajonnan sisään mahtui 2 613 kuviota, mikä oli 67,8 prosenttia aineiston kuvioista. Aineisto ei täysin noudattanut normaalijakaumaa, mikä näkyi ajouratunnuksissa: ajouravälien jakauma on vino oikealle (35a), uratiheyden jakauma puolestaan vasemmalle (35b).

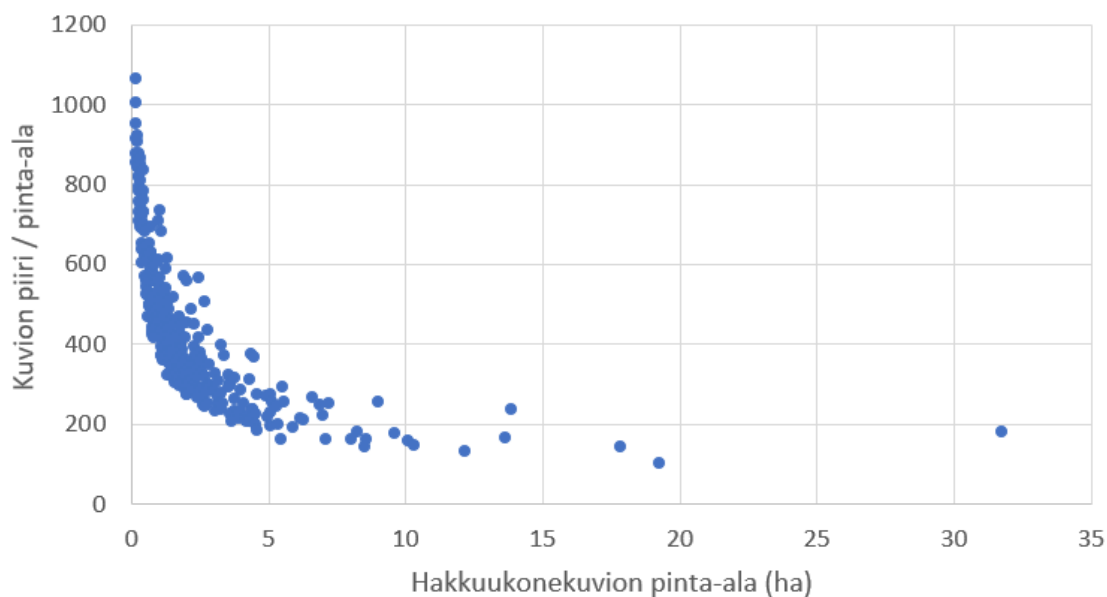
Ajouraverkoston uratiheyttä tarkasteltiin erikseen referenssikuvioiden osajoukon kohdalla. Uratiheydet referenssikuvioiden osalta eri hakkuutapojen mukaan on esitetty kuvassa 36. Uratiheydet laskettiin käyttämällä hakkuukonekuvioiden pinta-aloja. Hakkuutapojen uratiheyden keskiarvot olivat: ensiharvennukset 581 m/ha, harvennukset

570 m/ha, avohakkuut 685 m/ha ja muut hakkuutavat 656 m/ha. Referenssikuvioiden muut hakkuutavat -ryhmä koostuu kolmesta ylispuiden poistosta, seitsemästä siemenpuuhakkuusta ja kahdesta muusta hakkuusta tai toimenpiteestä. Tässäkin ryhmässä ajourien vaihteluväli oli varsin pientä, lukuun ottamatta yhtä poikkeusta, jossa uratiheys oli 328 m/ha. Kyseessä oli ylispuiden poisto, jonka ajouraverkosto on harva, vaikka kuviolta on poistettu runkoja tasaisesti. Runkojen määrä on kuitenkin liian vähäinen kunnollisen automaattisen ajouraverkoston muodostamiseksi, joten ajourat ovat pienissä pätkissä pitkin kuviota (ks. liite 3).



Kuva 36. Uratiheys referenssivertailuun käytetyillä hakkuukonekuvioilla hakkuutavoittain. Punaiset viivat kuvaavat hakkuutavan keskiarvoa.

Kuvioiden muotoparametrit laskettiin käyttämällä sekä neliön että ympyrän muotoa perusarvona. Yleisesti ottaen neliön muotoista ja ympyrän muotoista kuviota kuvaavat muotoparametrit tuottivat hakkuukonekuvioille hyvin samankaltaisia arvoja. Kuvio- ja ajouratuloksille ei löydetty tilastollista korrelaatiota muotoparametrien kanssa. Kuvioiden muotoindeksi on kuvassa 37, ja siitä näkyy piirin ja pinta-alan suhteen pieneneminen kuvion koon kasvaessa. Myöskään muotoindeksi ei korreloinut kuviokohtaisten tulosten kanssa.



Kuva 37. Muotoindeksi kuvaa kuvion piirin suhdetta kuvion pinta-alaan.

### 3.2.2 Maastomittausta simuloimalla lasketut uravälit

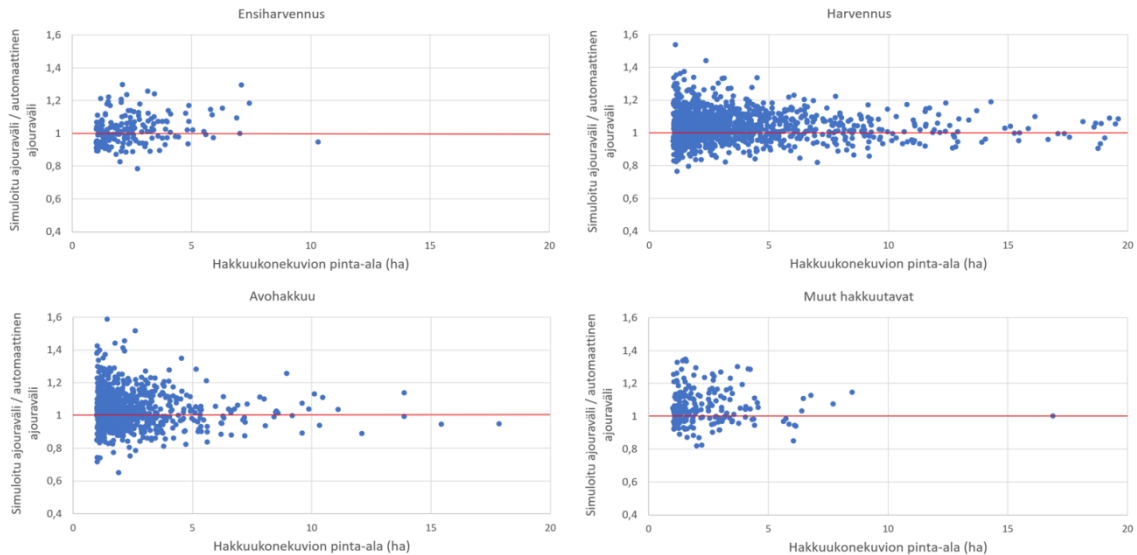
Automaattiselta, koko kuvion kattavalta ajouraverkostolta laskettuja keskimääräisiä ajouravälejä verrattiin Metsäkeskuksen maastomittausta simuloimalla laskettuihin keskimääräisiin uraväleihin (ks. luku 2.3). Simuloidut ajouravälit laskettiin niille yli hehtaarin kokoisille kuvioille, joille simuloinnin näytteistuspisteet voitiin muodostaa. Simulointiaineiston kuvioiden määräksi tuli 2 363 (Taulukko 7).

Taulukko 7. Ajouravälien suhdeluvut ja erot automaattisen ajouraverkoston ja maastomittauksen simuloinnin välillä. Uratiheydet on laskettu käyttämällä hakkuukonekuvioiden pinta-alaa.

Hakkuutapa	n	Osuus kuvioista (%)	Uratiheyksien keskiarvo (m/ha)	Automaattisten uravälien keskiarvo (m)	Simuloinnin uravälien keskiarvo (m)	Ajouravälien suhdeluku (simuloitu uraväli / automaattinen uraväli)
Ensiharvennus	171	7,2	583	20,6	21,1	1,023
Harvennus	1222	51,7	565	21,1	21,9	1,039
Avohakkuu	786	33,3	675	17,6	18,2	1,036
Muut hakkuutavat	184	7,8	582	19,6	20,8	1,062
Yhteensä	2363	100	604	19,8	20,6	1,039

Simulaatioaineiston kuvioiden automaattinen ajouraväli oli keskimäärin 19,8 metriä ja simuloitu uraväli 20,6 metriä. Simuloidut keskimääräiset ajouraväliarvot korreloivat melko hyvin koko uraverkostolta automaattisesti laskettujen ajouravälien kanssa kaikilla yleisimmillä hakkuutavoilla. Simuloidut ajouravälit olivat yleisimmillä hakkuutavoilla keskimäärin alle 4 % automaattisesti muodostettuja ajouravälejä leveämmät. Ero johtuu

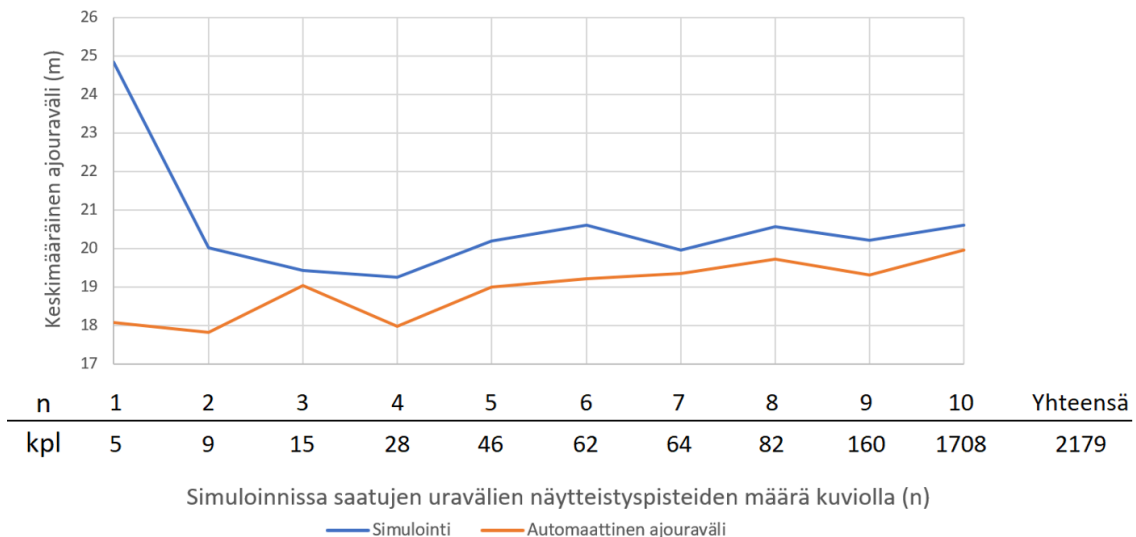
osittain siitä, että simuloituja ajouraverkostoja ei ole voitu muodostaa kaikille, etenkin muodoltaan hajanaisille kuvioille. Myös ajouravälien suhdeluku etenkin harvennuksilla ja avohakkuilla lähestyi karkeasti arvoa 1 kuvion pinta-alan kasvaessa (Kuva 38).



Kuva 38. Ajouravälien suhdeluvut ajoura-aineistossa jaoteltuna hakkuutapojen mukaan. Yli 20 hehtaarin harvennuksia on 10 kpl. Niiden ajouravälien suhdeluku oli keskimäärin 1,073.

Metsätehon Asko Poikelan mukaan kahdeksan näytepistettä on riittävä määrä kohteen luotettavaan laskentaan (suullinen tiedonanto, toukokuu 2020). Kahdeksalla ja sitä suuremmilla näytepistemäärillä simulointi korreloi automaattisesti tuotetun ajouralaskennan uravälien kanssa siten, että simuloitu ajouraväli oli hieman alle metrin leveämpi kuin automaattinen ajouraväli (Kuva 39). Ero johtunee muun muassa laskentatapojen uravälihavaintojen määrän ja alueellisen kattavuuden eroista kuvioilla.

Simuloinnista saadut ajouravälit mukailivat koko kuviolta määritettyjä ajouravälejä sitä paremmin, mitä enemmän kuviolta oli saatu näytepisteitä simulointia varten (Kuva 39). Simuloinnissa yhdeltä kuviolta mitattavien näytepisteiden maksimimäärä oli 10, mutta osalla kuvioista näytemäärä jäi tätä pienemmäksi. Simuloinnissa ajouravälien näytepisteiden lukumäärä  $n$  vaihteli 1–10 ollen keskimäärin 9,4. Vastaavasti automaattisella ajouraverkostolla uravälihavaintojen lukumäärä oli 11–3343 ja keskiarvo 220,6. Toisin sanoen automaattisen ajouraverkoston uravälihavaintojen lukumäärä oli keskimäärin yli 23-kertainen simuloinnin näytepisteiden lukumäärään verrattuna.



Kuva 39. Simuloitujen ajouravälien vertailu automaattisiin ajouraväleihin kolmen yleisimmän hakkuutavan osalta. Kuvaajassa on huomioitu ainoastaan yli hehtaarin kokoiset kuviot. Kuvaajan X-akselilla on simuloinnin näytteistyspisteiden kuviokohtainen lukumäärä (n). Simuloitu keskimääräinen ajouraväli ja vastaavan kuviojoukon automaattisesti tuotettu ajouraväli ovat Y-akselilla. Taulukossa on esitetty kuvioiden lukumäärät (kpl) sen mukaisesti, montako ajouravälin näytepistettä simuloinnissa kuviolta saatiin.

## 4 TARKASTELU

Tarkastelussa käydään läpi aluksi hakkuukonekuvioiden pinta-alojen ja sijaintien vertailu referenssikuvioihin virhelähteineen. Ajouraverkoston tunnuksat, mukaan lukien niiden vertailu ajouravälien maastomittausta simuloimalla saatuihin tuloksiin, esitetään omana alalukunaan.

### 4.1 Kuvioiden vertailu

Koko aineisto käsitti kaiken kaikkiaan 4440 kuvioita, joista lopulliseen referenssiaineistoon valikoitui yhteensä 320 kuviota eli noin seitsemän prosenttia koko aineistosta. 320 kuvion referenssiaineisto edusti hyvin koko aineistoa niin hakkuutapajakaumaltaan kuin pinta-alajakaumaltaan. Referenssikuvioilla harvennusten osuus oli hieman pienempi kuin koko aineistossa, missä se kasvoi isompiin kuvioihin mentäessä. Avohakkuiden osuus puolestaan oli selvästi suurin referenssiaineistossa. Avohakkuiden suurempaa osuutta referenssikuvioilla selittää niiden helpohko rajaaminen ilmakuvista. Alle 3 hehtaarin kuvioilla avohakkuu oli yleisin menetelmä, kun taas yli 3 hehtaarin kuvioilla harvennusten osuus kasvoi suurimmaksi. Koko aineistossa oli mukana 31 suojuspuuhakkuuta, mutta niistä ei ollut yhtään referenssikuvioita.

Pinta-alan vaihteluväli koko aineistossa oli suurempi kuin referenssiaineistossa, mutta referenssikuvioilla pinta-alojen mediaani ja keskiarvo olivat suuremmat. Tämä johtuu osittain siitä, että referenssikuvioista suurin osa oli avohakkuita, joiden pinta-alojen keskiarvo oli selvästi suurempi kuin koko aineiston avohakkuiden.

Pienten kuvioden digitoiminen referensseiksi oli haastavaa. Koko aineistossa valtaosa kuvioista oli pieniä; alle 3 hehtaarin kuvioita oli liki 77 prosenttia. Pienillä kuvioilla vähäisetkin virheet kuviorajoissa ovat merkittäviä suhteessa hakkuukonekuvion pinta-alaan. Etenkin harvennusten havainnoiminen tarkasti pienistä kuvioista oli haasteellista, koska ilmakuvan tekstuuri ja sävyt eivät juuri muutu muutamien latvojen poistuessa ilmakuvasista. Isompia kuvioita digitoitaessa harvennusten rajaaminen helpottui, koska ilmakuvasista erottaa paremmin suuria linjoja.

#### ***4.1.1 Kuvioden pinta-alan osuvuus***

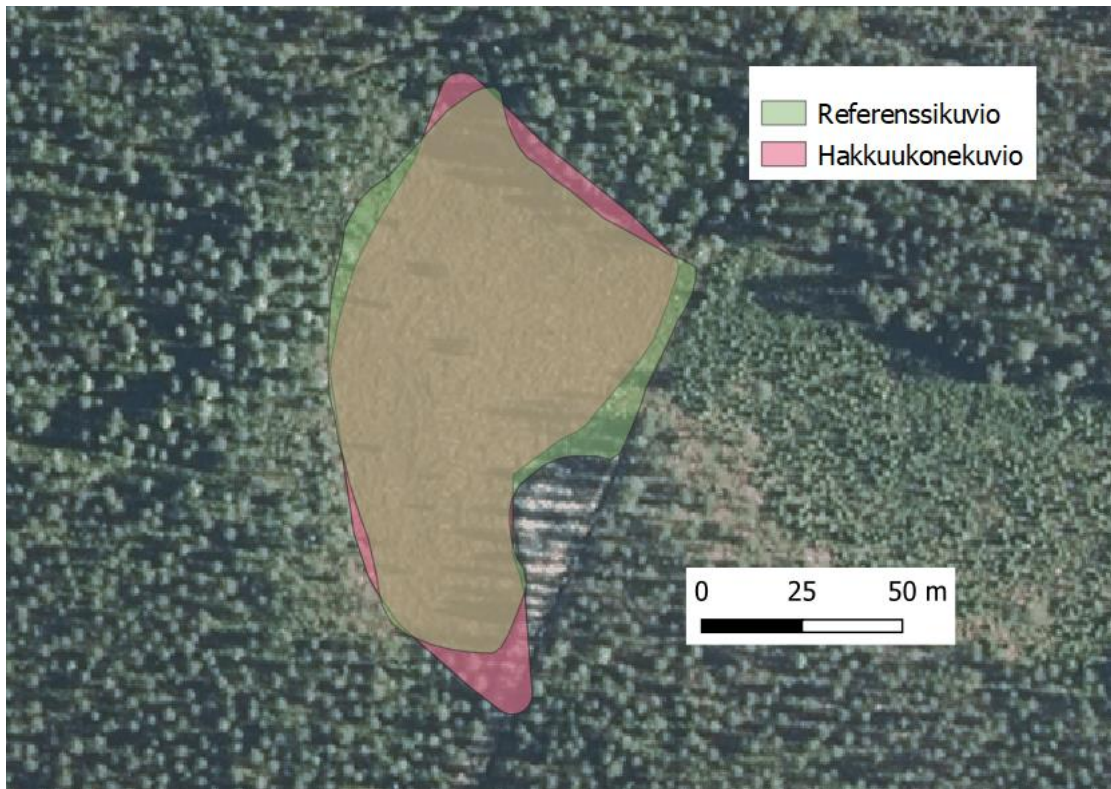
Kuvioden pinta-alan osuvuutta tarkasteltiin hakkuutapakohtaisesti kolmen yleisimmän hakkuutavan mukaan. Muista hakkuutavoista laskettiin vain yhteiset keskiarvot toimenpiteiden vaihtelevan luonteen ja epätarkkuuksien vuoksi. Esimerkiksi ylispuuhakkuissa kuvion rajojen määrittäminen digitointivaiheessa oli todella vaikeaa, koska puustoa oli usein poistettu alueelta harvakseltaan. Joissakin tapauksissa aineistossa ilmoitettu hakkuutapa oli ilmakuvaan verrattaessa väärä.

Kaikilla hakkuutavoilla hakkuukonekuviot olivat keskimäärin systemaattisesti hieman referenssikuvioita suurempia. Tarkin pinta-alojen suhdeluku oli harvennuksilla, joilla yliarviota pinta-alassa oli keskimäärin kaksi prosenttia. Ensiharvennuksilla vastaava luku oli 4,4 prosenttia ja avohakkuilla 3,4 prosenttia (ks. taulukko 5 s. 42). Harvennuskuvioilla pinta-alojen vaihtelu oli suurinta (0,15–30,9 ha), mikä on saattanut vaikuttaa siihen, että harvennuksilla myös pinta-alojen suhdeluvut olivat keskimäärin lähimpänä toisiaan; kuvioden pinta-alojen kasvaessa hakkuukonekuvioden ja referenssikuvioden pinta-alojen ero pieneni.

Pinta-alojen suhdeluvuissa oli kuvioden kokoluokittaista vaihtelua eri hakkuutavoilla. Erikoista oli huomata, että avohakkuilla referenssikuviot olivat hakkuukonekuvioita suurempia yli 3 hehtaarin pinta-aloilla. Harvennushakkuilla puolestaan hakkuukonekuviot

olivat referenssikuvioita selvästi suurempia kaikissa paitsi kokoluokassa 0,75–1,5 hehtaaria. Ensiharvennuksia ei ollut lainkaan yli kymmenen hehtaarin kokoluokassa. Muiden hakkuutapojen arvojen vaihteluväli oli suurta kaikissa pinta-alaluokissa johtuen niiden vähäisestä määrästä aineistossa ja siitä, että ne olivat huonosti keskenään vertailtavia.

Referenssiaineiston paras yksittäisen kuvion pinta-alavastavuus saavutettiin kuvan 40 esimerkikuvioilla, jossa pinta-alojen suhdeluku oli 1,0002. Kyseessä on pieni, noin 0,76 hehtaarin avohakkuu. Vaikka hakkuukonekuvion reunat eivät täysin vastaa toimenpidekuviota, on kuvion sijainti myös yleisesti ottaen riittävän hyvä; kuvioreunat poikkeavat toisistaan enimmäkseen vain muutaman metrin verran.



Kuva 40. Esimerkkikuvio, jolla hakkuukonekuvion pinta-ala vastaa parhaiten referenssikuvioita koko aineistossa. Itä- ja länsipuolella ulompana oleva referenssikuvion piiri myötäilee avohakkuun rajoja, mutta hakkuukone on runkoa kaataessaan ollut selvästi kuvion sisällä. Etelässä hakkuukone on tehnyt pienen ajouran, jonka varrelta se on kaatanut muutaman rungon.

Hakkuukoneaineisto ja automaattinen kuviointimenetelmä aiheuttivat virheitä hakkuukonekuvioihin. Jos yksittäisiä hakkuukoneen sijainteja oli kovin lähellä kuvion reunoja, laajeni kuvioksi muodostuva alue kolmioinnissa kyseisten pisteiden takia suhteessa paljon. Laajenemisvaikutus oli suhteellisesti sitä suurempi, mitä pienemmästä kuviosta oli kyse.

Lisäksi menetelmä rajasi kuvioden reunat melko suoraviivaisesti, joten kovin pieniä yksityiskohtia niihin ei muodostunut.

Kaikkiaan tutkimuksen tulokset tukevat hypoteesia, jonka mukaan kuvioden suuretessa hakkuukonekuvion ja digitoidun referenssikuvion pinta-alaero pienenee. Tämä johtuu siitä, että kuvioden kasvaessa pienet GNSS:n tarkkuusvirheet ja yksittäisten hakattujen runkojen sijaintipisteiden sijainti eivät kasvata alaa suhteettoman paljon automaattisen kuvioinnin puskuroinnissa. Kaikilla hakkuutavoilla hakkuukonekuvioden ja referenssikuvioden pinta-alavastaavuus keskimäärin parani kuvion pinta-alan kasvaessa. Pienillä kuvioilla pinta-alojen vastaavuudessa oli enemmän vaihtelua, koska niissä pienetkin erot olivat huomattavia suhteessa kuvion kokoon. Pinta-alaluokittain lasketut pinta-alojen suhdelukujen keskiarvot puoltavat näkemystä, että suuremmilla kuvioilla pinta-alavastaavuus on pääosin pieniä kuvioita parempaa. Yli kymmenen hehtaarin kuvioilla vastaavuus heikkeni hieman, mutta yli kymmenen hehtaarin kuvioden osuus oli referenssiaineistosta vain 2,5 prosenttia (8 kuviota). Myös tieltä ja pelloilta hakatut rungot ja muut hakkuukonekuvioden aineistossa olevat kuviokohtaiset poikkeamat näkyvät tuloksissa.

Työssä tutkittiin myös hakkuukoneiden paikannustarkkuuden vaikutusta kuvioden osuuteen. Tarkemmalla paikannuksella hakkuukonekuvioden ja referenssikuvioden pinta-alat poikkesivat keskimäärin 3,0 prosenttia ja epätarkemmalla 4,1 prosenttia toisistaan (Kuva 28 s. 43). Tarkemman paikannuksen hakkuukoneilla hakatuista kuvioista yli puolet (57 %) oli referenssikuvioita suurempia. Vastaava luku oli epätarkemman paikannuksen hakkuukonekuvioilla 60 %. Epätarkemmalla paikannuslaitteella kuvioden osuus, jossa hakkuukonekuvio oli referenssikuvioita suurempi, kasvoi siten hieman. Tämä on ymmärrettävää, sillä runkojen sijaintipisteiden paikannuksen epätarkkuus näkyy koko kuvion suurentumisena. Tarkemman ja epätarkemman GNSS-paikannuksen välillä ei pinta-alojen suhdelukujen tuloksissa kuitenkaan ollut tilastollista merkitsevyyttä. Näin ollen työn tulosten perusteella ei havaittu selkeää säätötarvetta eri paikannustarkkuuksien hakkuukonekuvioden pinta-aloissa, eritoten niihin vaikuttavissa puskuriparametreissa.

Paikannustarkkuuden vaikutuksen arvioinnissa on huomattava, että epätarkemman paikannuksen referenssiaineiston määrä jäi pieneksi. Tässä työssä epätarkempien paikannuksen kuvioden osuus oli hieman pienempi kuin aiemmassa työssä Melkas ym. (2020), jossa aineisto oli kerätty tätä työtä noin kaksi vuotta aiemmin. On mahdollista, että



hakkuukoneiden paikannuslaitteistot ovat tuolla aikavälillä keskimäärin hieman parantuneet konekannan uusiutumisen myötä. Myös lohko kohtaista hakkuukoneiden paikannustarkkuutta oli arvioitu numeerisesti paremman tiedon puuttuessa, mikä voi aiheuttaa virhettä tarkkuusluokitteluun.

Maisemamaakuntien kesken ei aineistossa ilmennyt merkittäviä eroja. Hakkuutapojen jakauma maisemamaakuntien sisällä oli samankaltainen kuin koko aineistossakin. Kaikilla maisemamaakunnilla avohakkuu oli selvästi yleisin hakkuu, ainoastaan Itäisen Järvi-Suomen, Lounaismaan ja Vaara-Karjalan alueilla oli muita hakkuuta, kuten harvennuksia, merkittävässä määrin. Avohakkuiden runsaus selittyy sillä, että ne olivat digitointivaiheessa selkeimpiä rajata. Vastaavasti kolmen yleisimmän hakkuutavan ulkopuoliset, marginaaliset hakkuut olivat edustettuina vain muutamilla kuvioilla (alle 4 prosenttia kuvioista), mikä selittyy sillä, että niitä oli lukumääräisesti selvästi vähemmän ja niiden todentaminen ilmakuvista oli vaikeaa.

Eteläisessä Suomessa ja Vaara-Karjalassa referenssikuvioiden määrä oli selvästi muita alueita pienempi. Tarkastelussa kuvioiden pinta-alojen suhdeluvut ovat melko samankaltaiset eri maisemamaakunnissa (vaihteluväli 1,002–1,062), eikä yksittäinen maisemamaakunta juuri nouse esiin. Kuvion sijainnilla maakuntatasolla ei siten vaikuttaisi olevan olennaista merkitystä kuvioiden ominaisuuksiin.

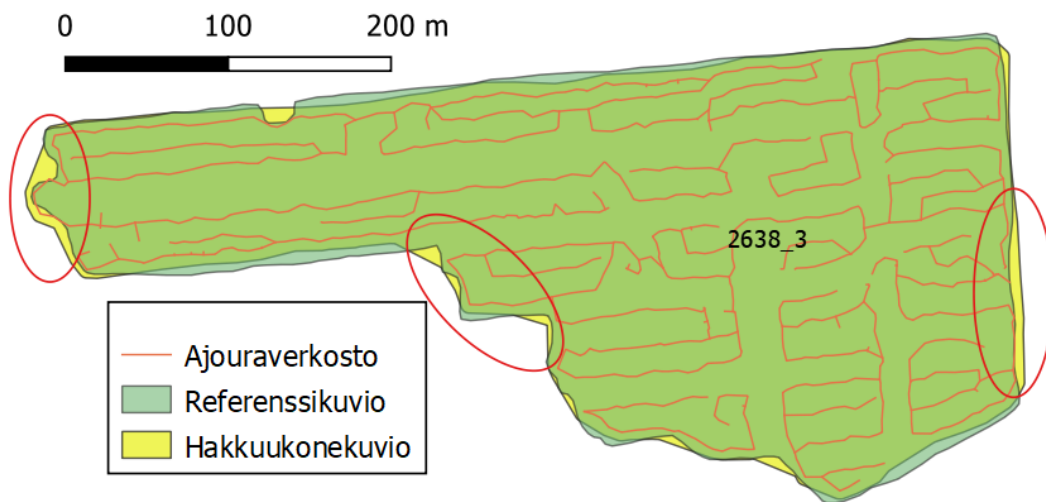
#### ***4.1.2 Kuvioiden sijainnin osuvuus***

Pinta-alojen osuvuuden ohella tarkasteltiin kuvioiden sijainnin osuvuutta. Kuvioilla, joiden pinta-alojen suhdeluku oli lähellä arvoa 1, hakkuukonekuvio ja referenssikuvio vastasivat hyvin toisiaan pinta-alan suhteen. Osalla kuvioista tällöin myös niiden muoto ja sijainti vastasivat hyvin referenssiä, mutta yhtä lailla muodossa ja sijainnissa saattoi olla eroja referenssikuvioihin nähden.

Kuvioiden sijainnin osuvuutta ja siirtymiä tarkasteltiin numeerisesti. Etenkin hakkuukonekuvion ja referenssikuvion reunojen keskimääräisen etäisyyden metrimääräiset arvot olivat melko pieniä (luku 3.1.2). Tämä johtui siitä, että kun kuviolta otetaan koko piirin mitalta keskimääräinen kuvion reunojen etäisyys referenssikuvion reunoista, arvo on yleensä melko lähellä nollaa, koska siirtymää on tasaisesti reunan molemmin puolin koko

reunan mitalla. Kuvioiden sijainnin osuvuuden kannalta tämä tarkoittaa, että keskimäärin kuvioiden reunat vastaavat aineistossa hyvin toisiaan. Kuviokohtaista vaihtelua oli kuitenkin melko paljon, kuten luvun 3.1.2 tulokset osoittivat.

Esimerkki hakkuukonekuvion reunojen osuvuudesta on kuvassa 41. Kyseessä on suuri 10 hehtaarin avohakkuukuvio, jossa kuvioiden keskinäinen sijainti on kohdallaan. Referenssikuvio on pieniltä osin hakkuukonekuviota tarkempi noudattelemaan toimenpidekuvion todellisia rajoja. Automaattinen kuvionmuodostus tekee piirin muodoista suurpiirteisempiä referenssikuvioon verrattuna (punaisella merkityt kohdat). Hakkuukonekuvion automaattinen muodostaminen häivyttää reunojen pienet vaihtelut ja hieman laajentaa kuviota joissakin kohdissa.



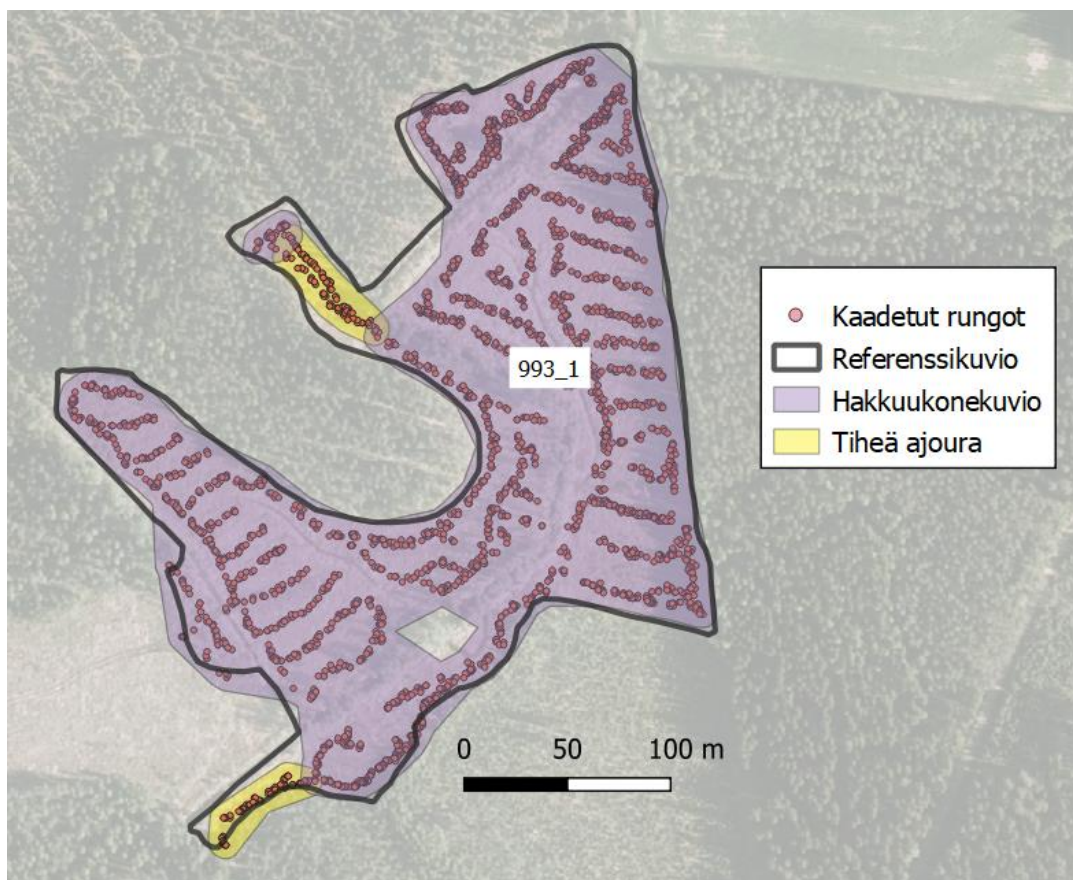
Kuva 41. Esimerkki kuvioiden sijainnin hyvästä vastaavuudesta. Kuviolla myös ajouraverkosto on tasainen ja keskimääräinen ajouraväli 18,4 metriä.

Kuvan 41 hakkuukonekuvion vähäiseen siirtymään on saattanut vaikuttaa hakkuutapa: avohakkuulla puusto ei häiritse paikannusta samalla tavalla kuin harvennuksilla, joilla jatkuva peitteisyys voi haitata satelliittisignaalin löytymistä. Lisäksi kyseinen kuvio sijaitsee Pohjanmaan alavalla alueella, jossa ei ole suuria maastonmuotoja häiritsemässä GNSS-signaaleja.

Hakkuukonekuvioiden yleisen vastaavuuden kannalta olennaista oli tiheiden ajourien tunnistaminen kuviointimenetelmässä (algoritmin I jälkeen). Referenssiaineistossa oli seitsemän kuviota, jotka yhden ajouran levyinen hakattu alue oli erottanut kahdeksi erilliseksi kuvioksi automaattisessa kuvioinnissa. Nämä kuviot olivat hakkuutietojen ja

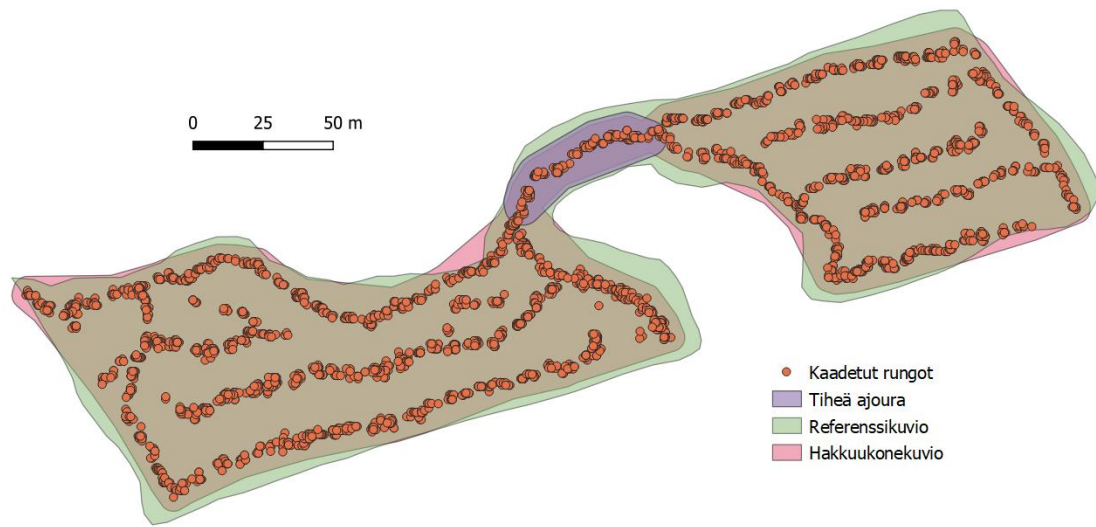
ilmakuvien perusteella kuitenkin samaa toimenpidekuviota, jota vastasi yksi yhtenäinen referenssikuvio. Jos tiheitä ajouria ei olisi lisätty hakkuukonekuvioihin, ne eivät olisi vastanneet lainkaan referenssikuvioita.

Yksi esimerkki tiheiden ajourien vaikutuksesta on kuvassa 42. Avohakkuukuvio on alun perin ollut kaksiosainen: ylemmän tiheän ajouran päässä on ollut erillinen pieni hakkuu-alue, joka ilmakuvan perusteella selvästi kuuluu kuvioon. Tiheän ajouran alueen lisääminen kuvioon yhdistää pienen erillisen alueen kuvioon kuuluvaksi. Samoin kuvion eteläpäässä oleva niemeke yhdistyy kuvioon. Tiheiden ajourien lisäämisen jälkeen lopullinen automaattinen kuvio on erittäin lähellä referenssikuvion muotoa ja kokoa: Alkuperäisen kuvion pinta-ala oli 4,9 hehtaaria. Tiheän ajouran lisäämisen jälkeen pinta-alaksi tuli 5,1 hehtaaria. Referenssikuvion ala on 5,3 hehtaaria. Valmiin hakkuukonekuvion pinta-alojen suhdeluku on siten noin 0,96, eli hakkuukonekuvio on vähän referenssikuviota pienempi. Sijainnin vastaavuus on visuaalisesti tarkasteltuna myös riittävä.



Kuva 42. Esimerkki kuviointimenetelmän yhteydessä tehtävästä tiheiden ajourien lisäämisestä hakkuukonekuvioon. Molempien kuvioiden pinta-aloihin on laskettu mukaan hakkuukonekuviossa oleva noin kuuden aarin kokoinen aukko, koska vertailussa keskitytään kuvion ääriveroihin. Hakkuukonekuvio vastaa lisäyksen jälkeen hyvin referenssikuviota, ja sijaintierotkin ovat maltillisia.

Toinen esimerkki kuvioiden yhdistymisestä tiheän ajouran seurauksena on esitettyä kuvassa 43. Automaattisen kuvioinnin algoritmi on tulkinut aluksi keskellä kuviota olevan yhden ajouran levyisen kuvio-osuuden olevan ajoura – hakkuukoneen siirtymisreitti paikasta toiseen – eikä suinkaan hakattavaa kuviota. Tarpeeksi tiheät ajourat kuitenkin liitettiin osaksi lopullista kuviota. Myös ilmakuvulta nähtiin, että tiheän ajouran ympäriltä on hakattu puustoa noin 20 metrin leveydeltä, joten se ei voi olla pelkkä siirtymäura.



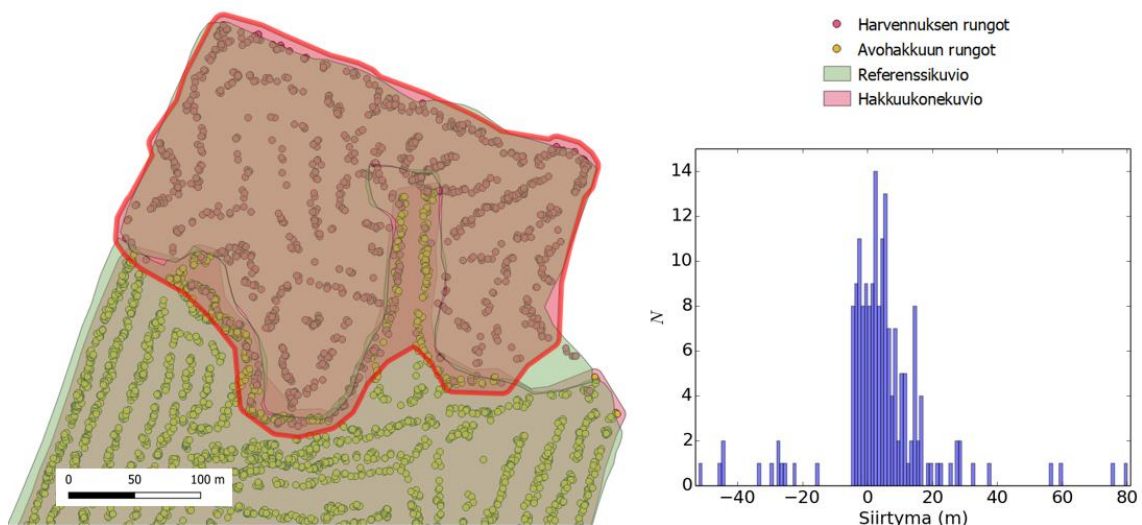
Kuva 43. Avohakkuukuvion keskellä on yhden ajouran levyinen alue, joka on tunnistettu hakattujen puiden tiheyden perusteella ns. tiheäksi ajouraksi. Tämä kuva havainnollistaa hakkuulohkon kuvioita ennen tiheän ajouran liittämistä kuvioon.

Metsätehon automaattinen kuviointimenetelmä tuottaa tasaisen rajauksen verrattuna aiemmin esiteltyihin menetelmiin (ks. luku 1.3.3). Skogforskin menetelmä perustuu hila-ruudukkoon (13 m x 13 m), jonka neliön sivuista koostuva raja-alue on melko karkea maastototouteen verrattuna. Ottavianin ym. (2020) menetelmä tuottaa puolestaan rajauksen, jonka reuna koostuu erimittaisista ympyrän kaarista.

Numeerisesta sijaintilaskennasta saatiin myös kuviokohtaiset siirtymän suuruusluokat eri pääsuunnissa. Kaikkien kuvioiden keskimääräinen siirtymä, laskettuna suuruusluokkarvoista, oli referenssiaineistossa pieni. Siirtymän suuruusluokkaa kuvaavista arvoista ei kuitenkaan saanut tarkkaa kuvaa siitä, miten suurelta osin kuvion reuna oli tosiasiaa siirtynyt, johtuen muun muassa kuvioiden muodon vaikutuksesta tarkastelusuunnissa. Siirtymien tulkintaan tarvittiin siksi numeeristen arvojen lisäksi valmiiden kuvioiden visuaalista vertailua ilmakuvilta nähtyihin hakkuisiin. Useimmissa tapauksissa kuvioiden

siirtymät olivat visuaalisesti kohtuullisia, yleensä muutaman metrin verran. Monissa tapauksissa siirtymille löydettiin selitys paikannustarkkuuden vaihteluista, hakkuun työta-voista tai aineiston muista yksityiskohdista.

Joissakin tapauksissa kuviolla oli paljon siirtymää vierekkäisistä hakkuista ja kuvion muodosta johtuen (Kuva 44). Kuvassa punaisella korostettu harvennus on tehty avohakkuun jälkeen. Kuvion eteläreuna on laajentunut reilusti, noin 10 metrin suuruusluokassa tai jopa enemmän avohakkuun puolelle. Syy tähän on se, että hakkuukone on kaatanut puita ajaessaan pitkin aiemmin tehtyä, kuvioiden välisellä rajalla olevaa ajouraa. Kuvi-oinnissa kaikki hakkuukoneen sijainnit puskuroidaan kuitenkin samalla vakioleveydellä. Lisäksi harvennuskuvion keskellä sisäänpäin oleva ”pisto” ei ole erottunut automaattisessa kuvioinnissa oikein, koska sen leveys on alle kahden vierekkäisen ajouran rajaetäisyyden. Tämän takia reunaetäisyyksien histogrammissa näkyy itseisarvoltaan suuria, jopa 80 metrin siirtymiä.

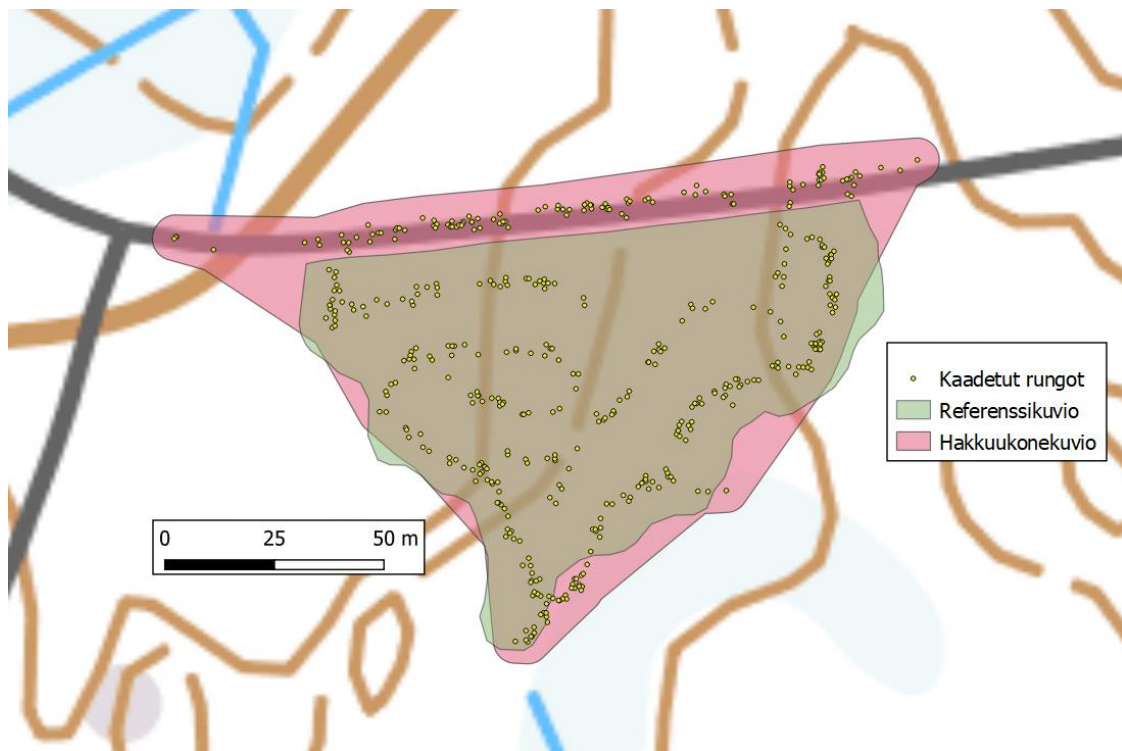


Kuva 44. Esimerkki siirtymästä. Harvennuksen hakkuukonekuvion piiri on korostettuna punaisella. Koko harvennuskuvion eteläreuna on siirtynyt reilusti viereisen avohakkuun puolelle, koska hakkuukone on ajanut kuvioiden rajalla olevaa ajouraa pitkin hakatessaan avohakkuun jälkeen tehtyä harvennusta. Lisäksi kuvion sisään ulottuva ”pisto” on jäänyt rajautumatta harvennuksen hakkuukonekuvioista.

Mikäli hakkuu on tehty osittain tieltä tai pelloilta käsin tai hakkuukone on joutunut kulke-maan kuvion rajalla toispuoleisesti hakaten, aiheuttaa se automaattiseen kuviointiin pinta-alan yliarviota ja siirtymää, jolloin lisäksi automaattisen hakkuukonekuvion pinta-ala kas-vaa (Kuva 45). Tässä esimerkissä kuvion pieni koko vaikuttaa siihen, että hakkuukoneku- vion pinta-ala (1,04 ha) on referenssikuvioita 39 % suurempi (0,75 ha). Tällaisissa

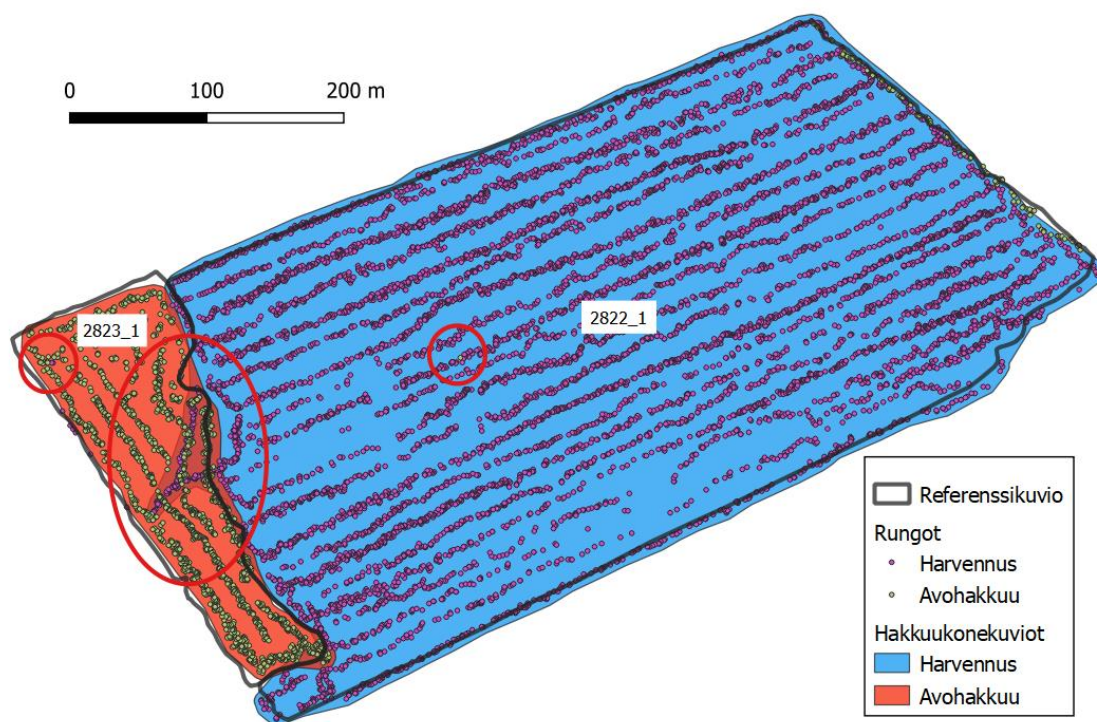


tapauksissa pinta-alan virhe voi syntyä hakkuutavasta riippumatta, koska hakkuukoneen kuljettaja luonnollisesti hyödyntää kuvion ympärillä olevia kulkureittejä aina kun mahdollista. Jos kuviota ollaan viemässä olemassa olevaan kuvioverkkoon, voidaan hakkuukonekuvio leikata tien alueella, jolloin kuvioden pinta-alan ja sijainnin vastaavuus paranevat.



Kuva 45. Hakkuukone on kaatanut runkoja hakkuualueen ulkopuolelta hyödyntäessään tietä, mikä näkyy hakkuukonekuviossa pohjoisreunan laajentumisena.

Joskus viereisille ja sivuavilla kuvioille on tehty eri toimenpiteitä. Kuvan 46 harvennus on tehty ensin, ja siinä on hakkuukonetiedon mukaan harvennettu myös osa avohakkuukuviota (isolla punaisella ovaalilla merkitty kohta). Niemeke voi tosin olla tehty myös hakkuukoneen ajouraksi kuviolle pääsemiseksi, varsinkin jos on pitänyt avata kuviolle useampi ajoura esimerkiksi kuormatraktorin kantavuussyistä. Kaksi viikkoa myöhemmin aloitettu avohakkuu kuitenkin liittyy harvennuksen kanssa, jolloin automaattiset kuviot menevät päällekkäin. Myöhemmin tehty avohakkuu häivyttää aiemmin tehdyn harvennuksen rajat ilmakuvalta, joka on otettu molempien hakkuiden jälkeen. Tällöin harvennuksen hakkuukonekuvion rajausta poikkeaa referenssikuvion rajauksesta johtuen hakkuun työtavasta.



Kuva 46. Esimerkki leikkaavista kuvioista. Harvennus (sininen alue) on aloitettu hakkuukonetietojen mukaan kaksi viikkoa ennen avohakkuuta.

Hakkuiden limittymisestä ei aina seuraa kuvioden limittymistä. Hakkuukonetietojen lohkotus erottaa eri lohkojen kuviot automaattisessa kuvioinnissa omiksi alueikseen, ja hakkuidentekojärjestys voidaan huomioida hakkuun aloitusaikojen avulla. Toisinaan joitakin runkoja on kaadettu toisen hakkuun alueelta, mutta automaattinen kuvionmuodostus ei huomioi yksittäisiä runkoja, koska niiden etäisyys muihin saman hakkuutavan runkoihin on liian suuri. Yksittäiset rungot voivat olla paikannusvirheestä johtuvia, tai sitten hakkuukone on kaatanut runkoja toisen kuvion puolelta esimerkiksi ajaessaan toisen leimikon läpi. Koillisreunalla on kaadettu avohakkuun runkoja, mutta niiden tiheys ei ole riittävä, jotta ne tulkittaisiin tiheäksi ajouraksi. Tämän takia ajouraa ei ole yhdistetty kumpaankaan kuvioon.

Vastaavissa tapauksissa, joissa esimerkiksi kaksi avohakkuuta sattuu vierekkäin ja osin limittyy, voi referenssikuvion digitoiminen olla mahdotonta. Koska automaattinen kuvionmuodostus osaa huomioida runkojen kaatojärjestyksen ja -ajankohdan, se pystyy muodostamaan kummallekin hakkuulle järkevän kuvion niiden limittymisestä huolimatta.

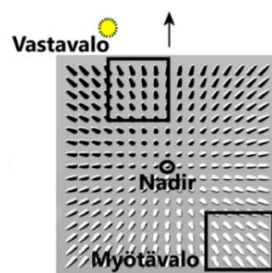
#### 4.1.3 Virhelähteitä referenssikuvien digitoinnissa

Referenssiaineiston vertailun yksi merkittävä virhelähde oli hakkuukonekuvioita vastaavien referenssikuvien digitointi ilmakuvilta. GNSS-paikannuksessa ilmenevien epätarkkuuksien lisäksi digitointia vaikeuttivat monet muut haasteet. Työssä havaittiin seuraavia kuvien digitointia hankaloittavia tekijöitä:

- Ajantasaisten ja riittävän laadukkaiden ilmakuvien puute, jolloin hakkukoneen tekemää toimenpidettä ei ole mahdollista havaita kuvista riittävän selkeästi
- Toimenpidekuviot rajoittuu aukeaan tai toiseen toimenpidekuvioon tai sen rajat ovat muutoin hankalasti määriteltävissä.
- Ilmakuvissa on pilvi tarkasteltavan alueen yläpuolella, jolloin digitointi ei onnistu.
- Eri vuorokauden- ja vuodenaikaan otetut ilmakuvat, jolloin rajojen hahmottaminen toimenpidekuvioista on hankalaa; esimerkiksi eri puolilta tulevat varjot.
- Ilmoitettu hakkuutoimenpide ei vastaa ilmakuvasta nähtyä toimenpidettä.
- Hakuutoimenpidealue on huomattavan erikokoinen ilmakuvassa näkyvään verrattuna.

Yksi virhelähde on digitointityön subjektiivisuus: vaikka ilmakeku olisi ajantasainen ja selkeä, visuaalisen tulkinnan pohjalta tehty kuviorajaus on aina altis tekijästä aiheutuvalle vaihtelulle (Mustonen ym. 2008). Tämän vuoksi ilmakuvien on oltava riittävän yksiselitteisiä, jotta suurilta eroilta välttyttäisiin.

Kuvion olle ilmakeku on harvoin otettu suoraan yläpuolelta, nadiirista, jolloin puiden latvat olisivat suurin piirtein runkojensa päällä helpottaen kuviorajaus. Puiden latvojen säteittäissiirtymä kasvaa ilmakevan reunoja kohti (Kuva 47). Tämän lisäksi eri kuvausajkaan otetut ilmakuvat muodostavat erilaiset varjot kuvien reunoille, jolloin kuvien tarkka rajaaminen on vaikeaa. Säteittäissiirtymä ja varjot otettiin digitoitaessa huomioon niin hyvin kuin mahdollista.



Kuva 47. Puunlatvojen säteittäissiirtymä havainnollistettuna.



## 4.2 Ajourat

Ajoura-aineisto koostui kaikkiaan 4 258 kuviosta, joille saatiin muodostetuksi automaattinen ajouraverkosto. Ajouraverkoston lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin automaattiselta ajouraverkostolta laskettuja ajouravälejä kuviokohtaisesti sekä verrattiin näin saatuja ajouravälejä Metsäkeskuksen maastokoealamittausta simuloivaan laskentaan. Simuloitu ajouraväli laskettiin 2 363 kuviolle. Kaikille kuvioille simulointi ei ollut mahdollinen kuvioiden pienen pinta-alan tai epäsäännöllisen muodon takia. Molempia tuloksia verrattiin myös ajouravälin suositusarvoon.

### 4.2.1 Laskennalliset ajouratunnukset

Ajouralaskentaa varten aineistosta poistettiin tietyillä hakkuutavoilla käsitellyt kuviot, muun muassa ylispuuhakkuut, koska niiden ajouraverkostot ovat hakkuutavan takia niin harvat, että ne vääristävät tuloksia ja näkyvät kuvaajissa poikkeamina. Kolmen yleisimmän hakkuutavan kuviot (3 856 kpl) kattavat aineistosta 91 prosenttia. Muiden hakkuutapojen jakautuminen aineistossa on seuraava:

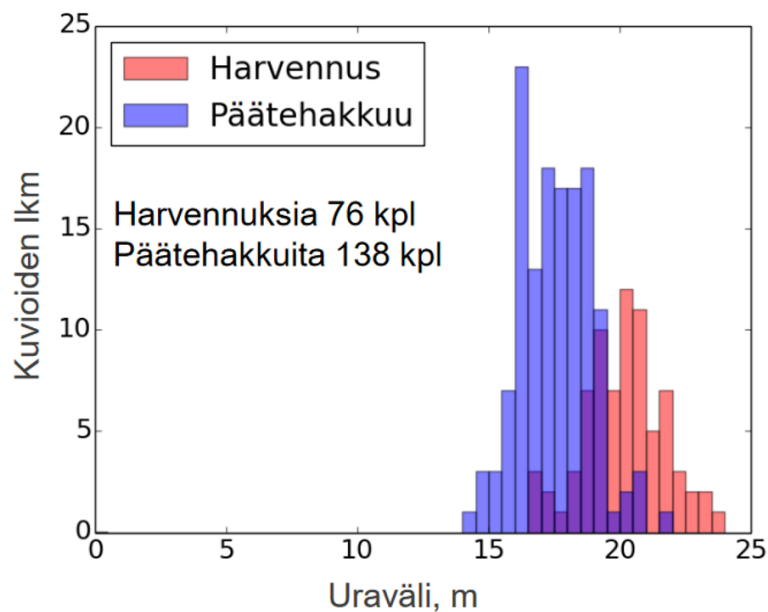
1. Ylispuiden poisto (172 kpl)
2. Suojuspuuhakkuu (29 kpl)
3. Siemenpuuhakkuu (125 kpl)
4. Muu hakkuu tai toimenpide (76 kpl).

Muut hakkuutavat oli kirjava ryhmä, johon kuului useita erilaisia metsänhoidollisia toimenpiteitä, minkä seurauksena etenkin niiden ajouratunnukset eivät olleet kovin vertailukelpoisia kolmen yleisimmän hakkuutavan kanssa. Tästä syystä muut hakkuutavat jätettiin tuloksissa vähemmälle huomiolle ja keskityttiin tarkastelemaan kuvioita, jotka olivat joko harvennettu tai avohakattu.

Etenkin harvennuksilla ajouravälit vastasivat hyvin tavoitearvoja, joiden mukaan ajouravälin tulisi olla keskimäärin vähintään 20 metriä (Metsätehon opas 1990). Metsäkeskuksen tilastojen (SMK 2019) mukaan keskimääräinen ajouraväli oli vuoden 2019 korjuujäljen otantatarkastuksilla koko maan alueella noin 21 metriä. Harvennuksilla, jotka kattivat yli puolet ajoura-aineistojen kuvioista, keskimääräinen ajouraväli oli tässä tutkimuksessa yli 21 metriä. Avohakkuilla ajouravälit olivat selvästi pienimmät, 17,6 metriä, ja

muilla hakkuutavoillakin alle 20 metriä. Avohakkuilla ajouravälit pienenevät, koska hakkuukoneen on päästävä lähemmäksi suuria runkoja. Toisaalta avohakkuilla ei tarvitse säästää kasvatuspinta-alaa eikä väistellä jätettäviä runkoja. Avohakkuille ei myöskään ole ajouravälisuositusta.

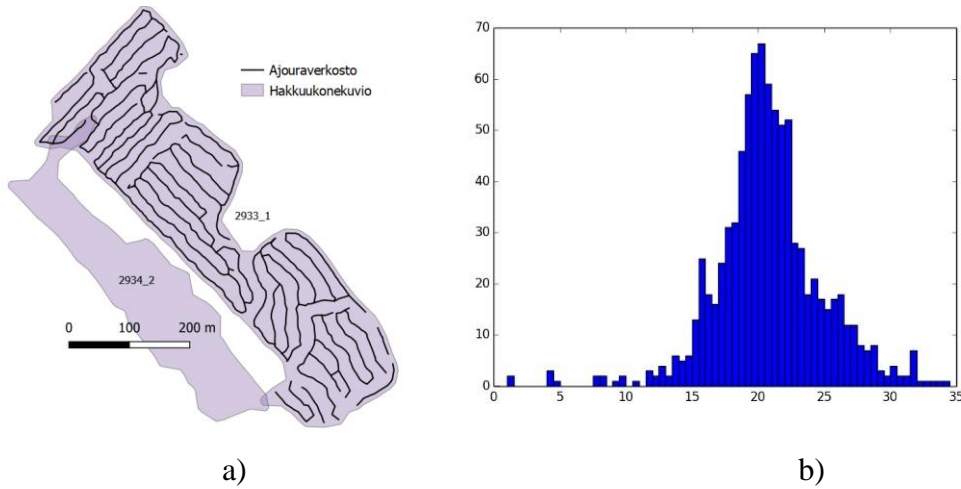
Tämän työn tulokset ovat samankaltaisia kuin aiemmissa tutkimuksissa saadut. Riekki ym. (2019) havaitsivat, että päätehakkuilla uraväli oli keskimäärin kapeampi kuin harvennuksilla johtuen muun muassa kaadettavien runkojen järeydestä (Kuva 48).



Kuva 48. Keskimääräinen ajouraväli aiemmassa, Etelä-Suomeen sijoittuneen pienen tutkimusaineiston kohteissa (Riekki ym. 2019).

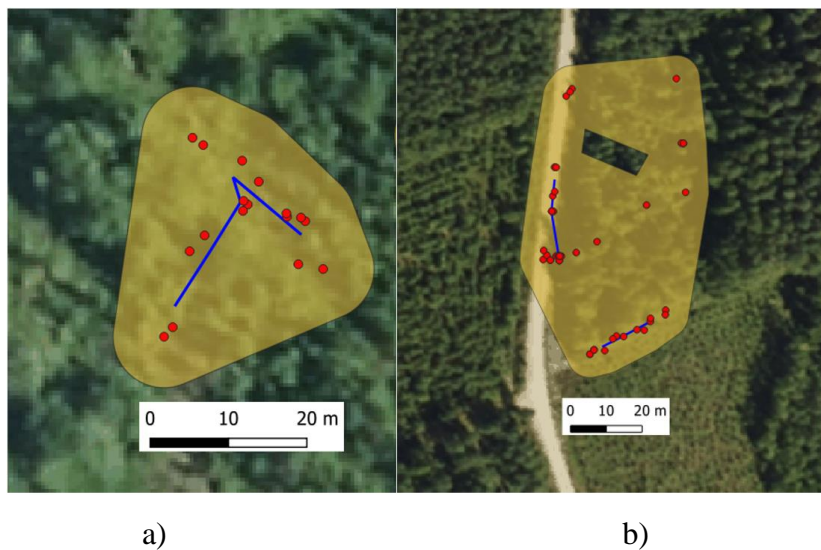
Tämän tutkimuksen mukaan ajouravälit hieman suurenevät isommilla kuvioilla. Tämä johtuu siitä, että harvennusten pinta-alojen vaihteluväli oli suurin ja harvennukset kattoivat 88 prosenttia kaikista aineiston yli 10 hehtaarin kuvioista. Suurempi kuviokoko mahdollistaa paremmin ajourien sijoittamisen riittävin välein. Lisäksi harvennuksilla ajouraväli on keskimäärin suurin kaikista hakkuutavoista, koska hakkuukone voi hyödyntää puomin maksimiulottuvuutta pieniä runkoja kaataessaan. Uratiheyskuvaaja on jokseenkin ajouravälikuvaajan karkea peilikuva (ks. kuva 35 s. 49), sillä ajouravälien kasvaessa kuviolle mahtuu vähemmän ajouraverkostoa.

Kuvassa 49 on tasaisesti jakautunut histogrammi harvennetun kuvion ajouraväleistä. Tasainen, liki normaalijakautunut histogrammi tarkoittaa, että uravälien keskihajonta on pysynyt melko pienenä.



Kuva 49. **a)** Harvennuskuvion ajouraverkosto. **b)** Ajouravälihavaintojen histogrammi. Ajouravälien keskiarvo on 20,8 m ja keskihajonta 4,1 m. Uratiheys kuviolla on 553 m/ha.

Koko aineistossa, sisältäen kaikki hakkuutavat, ajouravälin vaihteluväli oli todella suuri: 1,07–34,43 metriä. Ääritapaukset ovat poikkeuksia, joissa kuvio on pieni tai hakkuutapa ei sovellu ajouralaskentaan (Kuva 50). Tällaisilla kuvioilla uraverkosto on liian harva tai epämääräinen, jotta siitä voitaisiin laskea päteviä ajouratunnuksia. Kaadettuja runkoja on kuviolla vähän eikä ajouravälien näytteistyspisteitä ole riittävästi.



Kuva 50. Kummankin kuvion ajouraverkosto on liian harva kelvolliseen ajouralaskentaan. Molemmilla kuvioilla automaattisen ajouraverkoston uravälihavaintojen lukumäärä on 1. **a)** Kuvio on liian pieni eikä sillä ole selvää ajouraverkostoa: pinta-ala on 0,055 ha ja keskimääräinen ajouraväli 1,07 metriä. Kyseessä on avohakkuukuvio. **b)** Ylispuiden poistolla ajouraverkoston keskimääräinen ajouraväli on 34,43 metriä, kuvion pinta-ala 0,27 ha.

Koska ajouravälien vaihteluväli koko aineistossa oli hyvin suuri, selvitettiin, minkä kokoluokan kuvioilla laskettuja uraväliarvoja voidaan pitää luotettavina. Kun kuvio oli pinta-alaltaan vähintään 0,75 ha, keskimääräiset uravälit alkoivat asettua 15–25 metriin (ks. kuva 32 s. 47). Alle 0,75 hehtaarin kuvioilla vaihtelu ajouravälihavaintojen määrässä oli suurta eikä pieni havaintomäärä riittänyt tuottamaan ajouraväleille kelvollista arvoa. Ajouralaskenta toimi siten hyvin lukuun ottamatta pienimmän kokoluokan kuvioita.

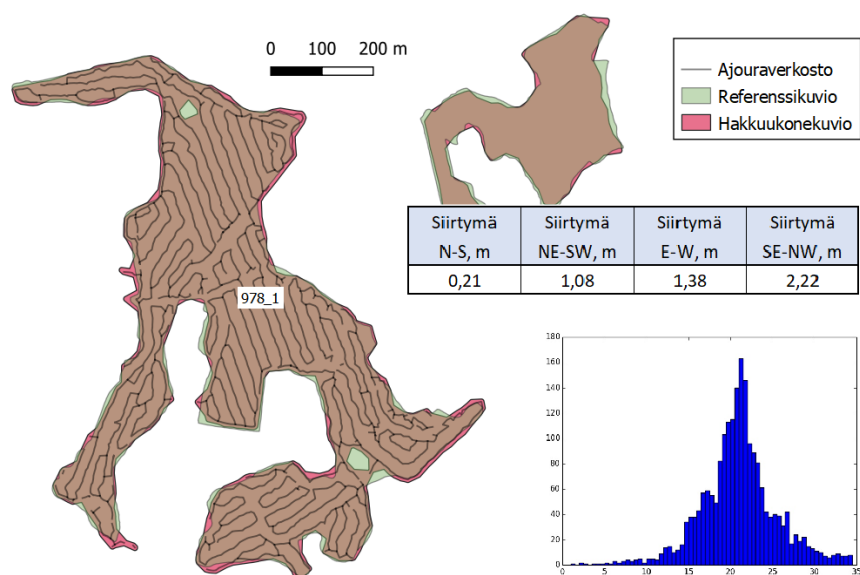
Laskennallisten uravälien tarkempaa selvitystä varten pitäisi tehdä ajouravälikartoitusta maastomittauksilla ja verrata niistä saatuja tuloksia automaattisen ajouraverkoston tunnuksiin. Pienessä mittakaavassa tätä ovat tutkineet Riekkö ym. (2019), joiden mukaan ajourien keskimääräinen paikannustarkkuus myös maastoverrokkeihin oli hyvä.

Ajouratiheyden riippuvuutta kuvion pinta-alan osuvuudesta tutkittiin käyttämällä digitoitujen referenssikuvioiden pinta-aloja hakkuukonekuvioiden sijaan. Kolmelle yleisimmälle hakkuutavalle referenssikuvioiden pinta-alan avulla lasketut keskimääräiset uratiheydet eivät merkittävästi eronneet arvoista, joiden laskemiseen oli käytetty hakkuukonekuvion pinta-alaa. Automaattisten hakkuukonekuvioiden pinta-ala on siten käyttökelpoinen tieto kuviokohtaisten ajouramäärien laskennassa.

Muotoparametrien vaikutuksen havaitseminen tuloksiin osoittautui haastavaksi. Kumpikaan muotoparametri tai muotoindeksi ei korreloinut ajouratulosten kanssa. Pienillä kuvioilla muotoparametrien arvot voivat vaihdella jonkin verran. Toisaalta pienten kuvioiden muidenkin tunnusten välillä on suuria eroavaisuuksia, jolloin on vaikea sanoa, johtuvatko erot kuvion muodosta vai koosta. Suuremmilla kuvioilla muoto ei ratkaisevasti vaikuta ajouratunnuksiin. Pinta-alan kasvaessa kuvion sisään mahtuu säännöllinen ajouraverkosto, vaikka kuvion muoto olisikin epämääräinen. Pienten kuvioiden muoto lähestyy laskennallisesta tuottamistavasta johtuen karkeasti ympyrää, joka kaksiulotteisista muodoista sulkee sisäänsä suurimman pinta-alan piiriin suhteutettuna. Tästä seuraa, että pienemmillä kuvioilla on keskimäärin suurempi muotoindeksi. (ks. kuva 37 s. 51). Kuvion pienentyessä sen alalle ei yksinkertaisesti mahdu kovin epäsäännöllisiä muotoja.

Isoilla kuvioilla muoto ei enää merkitsevästi vaikuta kuvion ajouratunnuksiin. Kuvan 51 harvennetulla kuviolla pinta-ala on yli 30 hehtaaria. Pinta-alan kasvaessa myös hakkuukonekuvion suhteellinen pinta-alaero referenssiin nähden pienenee keskimäärin. Pinta-

alojen suhdeluku on 1,026 ja kuvion sijainnin osuvuus pinta-alan suhteutettuna erinomainen.



Kuva 51. Ison hakkuukonekuvion pinta-ala vastaa hyvin referenssikuviota harvennushakkuulla. Myös sijainnin vastaavuus suhteessa kuvion pinta-alan on erinomainen. Kuvion keskimääräinen ajouraväli on 21,03 metriä.

#### 4.2.2 Ajouravälilaskennan simulointi

Metsäkeskuksen maastomittausta mallintavaan simulointiin saatiin 2 363 kuviota. Simuloinnissa tarkasteltiin ainoastaan kolmea yleisintä hakkuutapaa, koska niiden ajouraverkostot ovat keskenään vertailukelpoisia. Sen sijaan muut hakkuutavat sisältävät hakkuutoimenpiteitä, joissa ajourat ovat epäsäännöllisiä ja usein joko epätavallisen tiheitä tai harvoja. Vähintään hehtaarin kokoisia kolmen yleisimmän hakkuutavan kuvioita simuloinnissa on 2 179, mikä on noin 92 prosenttia simulointiaineiston kuvioista. Simuloinnin näytteistyspisteiden määrä vaihteli 1–10. Maastomittauksissa pyritään saamaan kuviolta 10 mittausalaa, mikäli kuvion pinta-ala ja muoto sen mahdollistavat. Käytännössä kahdeksan havaintoa riittää onnistuneeseen maastomittaukseen.

Ajouravälilaskennan simulointi tuotti ajouravälit, jotka olivat keskimäärin vajaan metrin verran automaattisia ajouravälejä leveämmät. Pienillä kuvioilla, joilla näytteistyspisteiden määrä oli vähäinen, erot simuloitujen ja automaattisten ajouraväliden välillä olivat suuremmat. Vähintään kahdeksan näytteistyspistettä sisältävien kuvioiden osuus oli 90 %. Kuviot, joilla näytteistyspisteitä oli vähän, olivat yleensä pieniä ja siksi niillä

automaattisen ajouraverkoston ja simuloinnin väliset erot saattoivat olla paikoin suuria. Kuvion pinta-alan kasvaessa myös näytteistyspisteiden määrä kasvaa melko tasaisesti. Kahdeksalla näytteistyspisteellä saavutetaan jo melko edustava otos kuvion ajouraväleistä. Sitä pienemmillä näytemäärillä simuloinnin tulosten luotettavuus heikkenee.

Simuloinnista saadut keskimääräiset ajouravälit olivat systemaattisesti automaattista ajouraverkostoa hieman suuremmat kaikissa näytemäärän luokissa ja kaikilla kuvion pinta-aloilla. Näytteistämällä laskettua kuvion ajouravälin arvoa pienensi muun muassa se, että jossakin osassa kuviota ajouria on jouduttu tihentämään, mutta kaikilta alueilta otetaan uravälihavaintoja tasavertaisesti. Sen sijaan simuloidun uravälin näytteistyspisteet otetaan kuvion päähalkaisijalta tai muilta kuvion keskialueilta, joilla ajourat on ilmeisesti voitu sijoittaa harvemmin. Automaattisen ajouraverkoston uravälihavaintojen lukumäärä kuviota kohti oli huomattavasti simuloinnin näytemäärää suurempi ja kattoi näin ollen kuvion alan selvästi simuloitua näytteistystä paremmin. Keskimäärin ero oli kuviokohtaisissa näytemäärissä yli 23-kertainen.

## **5 JOHTOPÄÄTÖKSET**

### **5.1 Automaattinen kuviointi**

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan todeta, että hakkuukoneen toteumatietoon perustuva menetelmä kuviorajausten tuottamiseksi soveltuu metsävaratietojen ajantasaisuutukseen. Menetelmä luo perustan toteutuneiden hakkuiden kuviorajausten integroimiseksi osaksi Metsäkeskuksen ajantasaista kuviomuotoista metsävaratietoa. Hakkuukonekuvioiden pinta-alavastaavuus ja sijainti ovat yleisimmillä hakkuutavoilla riittävän hyvät kaiken kokoisilla kuvioilla suhteessa referenssikuvioihin. Ainoastaan pienimmillä kuvioilla pinta-alojen ero on paikoin merkittävän suuri. Ero kuitenkin pienenee kuvioiden pinta-alan kasvaessa. Hakkuukonekuvioiden kokoluokalla on siten melko huomattava merkitys pinta-alan vastaavuuteen referenssikuvioihin nähden.

Hakkuukonekuvioiden pinta-ala on keskimäärin hieman referenssikuvioita suurempi. Hakkuukonekuvioiden reunat ovat keskimäärin noin metrin verran referenssien ulkopuolella. Hakkuukonekuvioiden suurempaa kokoa selittää osaltaan aineistossa olevat

yksittäiset sijainnit kuvion reunoilla, jotka voivat johtua paikannusvirheen lisäksi myös hakkuun työtavoista. Todellisuudessa paikannusvirhe ei ole kaikkialla samankokoinen eikä kohdennu joka suuntaan vaan aiheuttaa paremminkin harhaa paikannukseen.

Vaikka tutkimuksen kuvioiden pinta-alojen suhdelukujen vaihteluväli oli melko suuri, automaattinen kuvionmuodostus toimi aineistolla todella hyvin. Verrattaessa kaikkien kuvioiden pinta-alaeroja suurimmalla osalla kuvioista pinta-alojen suhdeluku oli 0,9–1,1. Esimerkiksi yli 3 hehtaarin kuvioista vastaavalle välille mahtui yli 90 prosenttia kuvioista.

Pinta-alan osuvuus ei ollut riippuvainen kuvion sijainnista laajassa mittakaavassa. Maisemamaakuntien välillä eri hakkuutapojen osuudet olivat hyvin samankaltaiset ja kuviot edustivat koko aineistoa tasapuolisesti. Maisemamaakuntien välillä oli eroja pinta-alojen suhdeluvuissa, mutta erot johtuivat pääosin kuvioiden keskimääräisistä pinta-aloista; kolme pienintä suhdelukua oli maisemamaakunnista, joissa kuviot olivat keskimäärin suurimmat. Maisemamaakuntien tarkastelun aineisto oli kuitenkin sen verran pieni (aluekohtainen kuviomäärä vaihteli 14–80), että yleistettävien johtopäätösten tekeminen ei ole perusteltua, vaan vaatisi laajempaa tarkastelua kattavammalla aineistolla.

Vertailtavien kuvioiden pinta-alaeron pieneneminen kuvion pinta-alan koon kasvaessa on hyvä asia automaattisen kuvionmuodostuksen kannalta. Pinta-ala on kuitenkin vain yksi kriteeri automaattisen kuvionmuodostuksen pätevyyttä tarkasteltaessa. Kuvioinnissa tärkeää on myös kuvion reunojen sijainnin tarkkuus sekä minkä verran hakkuukonekuvio on siirtynyt referenssikuvioon nähden. Hakkuukoneen paikannustarkkuus vaikuttaa merkittävästi myös hakkuukonekuvioiden muotoon.

Yleisesti ottaen kuvioiden sijainti oli hyvä. Kuvioiden keskimääräinen reunaetäisyys vaihteli referenssiaineistossa melko tasaisesti niin pienillä kuin suurillakin kuvioilla ollen suurimmillaankin alle 10 metrin luokkaa. Keskimääräisen reunaetäisyyden vaihtelu ei ollut suuresti riippuvainen kuvion pinta-alasta (Liite 4).

Kuvioilla, joilla hakkuukonekuvion reuna oli keskimäärin enemmän referenssikuvion reunan ulkopuolella, hakkuukonekuvio oli usein laajentunut ihmisen rakentaman esteen kuten tien vaikutuksesta. Toisaalta melkein puolet kuvioista oli sellaisia, joilla referenssikuvion reuna oli keskimäärin enemmän hakkuukonekuvion reunan ulkopuolella. Syynä näihin oli esimerkiksi se, että hakkuukone on kuviolla liikkeessaan kaatanut puita

ollessaan reilusti kuvion sisäpuolella ja hyödyntänyt puomin ulottuvuutta käsitellessään kuvion reunalla olevia runkoja. Digitointi kuitenkin tehtiin ilmakuvas- ta nähdyn puuston poistuman mukaan, jolloin referenssikuvion reunat tulevat helposti hakkuukonekuvion reunojen ulkopuolelle. Tällaisia kuvioita oli sekä harvennuksissa että avohakkuissa.

Reunaetäisyyden ja ilmansuuntien mukaisten siirtymäarvojen lisäksi kuvioiden keskinäistä sijaintia tarkasteltiin silmämääräisesti. Kuvioden sijainti oli visuaalisesti tarkasteltunakin pääosin hyvä. Suuria paikannusvirheitä kuvioilla ei ollut, ja merkittävimmät kuvioden reunojen keskinäiset siirtymät eivät johtuneet siitä, että kuvio sinänsä olisi siirtynyt, vaan syynä oli useimmiten hakkuukoneen työskentelytavasta johtunut siirtymä, kuten tien tai pellon vaikutuksesta aiheutunut laajentuma.

Hakkuukoneaineisto sisältää aina käytännön työn suorituksesta johtuvia ominaispiirteitä, jotka seuraavat korjuun ja lohkotuksen yksityiskohdista. Hakkuukoneen kuljettaja kirjaa osan näistä tiedoista aineistoon. Kuljettajan vastuulla on korjuulohkon ja hakkuutavan kirjautuminen oikealle lohkolle.

Monet tekijät aiheuttavat pinta-ala- ja sijaintivirhettä kuvioihin, mutta automaattinen kuviointimenetelmä on kuitenkin vain osa ajantasaisen metsävarakuviointin ylläpitoa. Kun hakkuukonekuviota viedään metsävarakuvioverkkoon, hakkuukonetiedoissa oleva hakkuun aloitusajankohta auttaa rajaamaan etenkin vierekkäisiä ja limittyviä kuvioita tarkemmin. Käyttämällä niin sanottua metsämaskia (<https://www.metsakeskus.fi/metsa-maski>) voidaan rajata muun muassa teiden ja peltojen alueet pois hakkuukonekuvioista. Tällöin kuvioiden sijainti paranisi, kun esimerkiksi teistä johtuva kuvioiden laajentuminen jäisi pois.

Haastavinta on saada siirtymäurat erilleen kuvioista ja toisaalta pystyä liittämään tiheet ajourat osaksi kuviota. Siirtymäurien erottaminen hakkuista automaattisesti on vaikeaa, koska kapeilla kuvioilla tai niiden osilla on vaikea määrittää, missä menee ajouran ja tiheen ajouran raja.

Automaattista kuvionmuodostusta voidaan yhä tarkentaa esimerkiksi säätämällä algoritmeissa käytettäviä parametreja laajempien tutkimusaineistojen perusteella. Hakkuukonekuvion laskentaa voisi kehittää, jos hakkuukonetiedossa huomioitaisiin puun sijainti



yhä tarkemmin. Tähän voitaisiin käyttää esimerkiksi Bhuiyanin ym. (2016) kehittämiä menetelmiä, joissa tallennetaan paitsi hakkuukoneen sijainti myös sen puomin suunta ja asento rungonkatkaisuhetkellä. Tämä parantaisi puun sijaintitietoa ja siten edelleen tarkentaisi kuvion pinta-alan ja sijainnin vastaavuutta (Saukkola ym. 2019).

Miltei ainoa asia, johon laskentoja ja algoritmeja iteroimalla ei voida vaikuttaa, on GNSS-paikannustarkkuus. Paikannuslaitteiden tarkkuutta kehitetään yhä ja niiden sijoittelua hakkuukoneessa voidaan parantaa. Hakkuukoneen puomin suunta ja sijainti on mahdollista jatkossa huomioida, jolloin runkojen sijaintipisteet saadaan kolmiointia varten kartalle vielä tarkemmin. Jatkuvasti vaihtuvaan GNSS-satelliittigeometriaan ei näillä toimenpiteillä ole kuitenkaan vaikutusta. Samoin metsän peitteisyys ja maaston muodot asettavat jatkossakin pieniä haasteita paikannustarkkuudelle, mutta tämän tutkimuksen valossa näillä seikoilla ei ole käytännön merkitystä automaattisessa kuvionmuodostuksessa.

## **5.2 Ajourat**

Tutkimuksen mukaan automaattinen ajouraverkoston muodostaminen toimi hyvin kolmella yleisimmällä hakkuutavalla ja ajouraverkostosta lasketut tunnuksat vastasivat ajouraväleille asetettuja tavoitearvoja sekä olivat yhteneviä hyvän metsänhoidon suositusten kanssa. Ajouralaskennalla tuotetut ajouravälit ovat samaa luokkaa aiempien tutkimusten tulosten kanssa (Rieki ym. 2019). Ainoastaan pienillä kuvioilla ajouravälien keskijointa oli melko suurta. Kuvion pieni koko vaikeuttaa kaikkien ajouratunnusten laskentaa ja automaattisen ajouraverkoston muodostamista.

Tavallisesti ensiharvennuksessa määritetään kuvion ajouraverkosto, jota käytetään myös myöhemmillä harvennuksilla. Siksi eri harvennuksilta saadut ajouratunnukset mukailivat toisiaan. Avohakkuilla ajouravälit pienenevät raskaampien runkojen lyhyen ottoetäisyyden takia. Toisaalta avohakkuiden ajouraväleillä ei ole niin suurta merkitystä, koska jäävää puustoa ei ole varottavana.

Automaattista ajouravälilaskentaa voitaisiin jatkossa hyödyntää lähikuljetuksen optimoinnissa, jolloin olisi mahdollista todentaa puunkorjuun onnistumista ajourien osalta. Metsänomistajat voivat halutessaan saada tarkempaa tietoa siitä, miten korjuu on

onnistunut ja miten metsässä on liikuttu. Uraverkostotietoa voidaan hyödyntää myös hakuukoneenkuljettajien koulutuksessa.

Maastomittausta simuloivat ajouravälin laskentatulokset korreloivat hyvin automaattisesti muodostettujen uraverkostojen keskimääräisen uravälin kanssa. Simuloinnin yliarvio ajouraväleille oli keskimäärin vain muutaman prosentin, vaikka näytteistyspisteiden määrässä oli laskentatapojen välillä huomattava ero. Jos simuloitavalle kuviolle saatiin riittävä määrä koealoja, simuloitavat ajouravälit vastasivat hyvin ajouraverkostosta laskettuja ajouravälejä.

Muotoparametrien tarkastelu osoittautui haastavaksi. Yleisesti ottaen neliön muotoista ja ympyrän muotoista kuviota kuvaavat muotoparametrit tuottivat hyvin samankaltaisia arvoja eikä niillä syntynyt suuria eroja kuvioinnissa tai ajouratunnuksissa. Pienillä kuvioilla vaihtelua oli paljon, joten ei voitu varmistua aiheutuvatko erot kuvion muodosta vai pienestä koosta. Suurille kuvioille pystytään paremmin sijoittamaan säännöllinen ajouraverkosto riippumatta kuvion muodosta. Myös kuvion piirin ja pinta-alan suhdetta mallintava muotoindeksi antoi numeerisia tuloksia, jotka olivat vain suuntaa antavia ja vaativat seurakseen esimerkiksi kuvioiden visuaalista tarkastelua.

## LÄHTEET

- Antinluoma, Tenhunen, Välimäki ja Heikkilä 2019. Automaattisen kuvioinnin kehittäminen (kärkihankeprojekti: 21003/512). Suomen metsäkeskus. 34 s.
- Belbo, H. & Talbot, B. 2020. Methods for harvest site delineation based on machine positions in harvester stem reports. NB-Nord 2020 conference proceedings, Skogforsk, työraportti 1061-2020. 44 s.
- Bhuiyan, N., Möller, J.J., Hannrup, B. & Arlinger, J. 2016. Automatisk Gallring-suppföljning-Areal Beräkning Samt Registrering av Kranvinkel för Identifiering av Stickvägsträd och Beräkning av Gallringskvot. [Automatic Follow-up of Thinning-Stand Area Estimation and Use of Crane angle Data to Identify Strip Road Trees and Calculate Thinning Quotient.] Arbetsrapport 899–2016. Skogforsk, Sweden. 60 s.
- Duckham, M., Kulik, L., Worboys, M. & Galton, A. 2008. Efficient generation of simple polygons for characterizing the shape of a set of points in the plane. *Pattern Recognit.* 2008, 41, s. 3224–3236.
- Forman, R.T.T. & Godron, M. 1986. *Landscape Ecology*. Cambridge.
- Hakkuukonetiedon käyttö metsävaratiedon ajantasaistuksessa 2018. Maa- ja metsätalousministeriö. Suomen Metsäkeskus, Metsäteho Oy. Metsätieto ja sähköiset palvelut – kärkihanke. 14 s.
- Heikkilä, J. 2017. Forest data services of the Finnish Forest Centre. Metsäkeskus.
- Holopainen, M., Hyyppä, J., Vastaranta, M. ja Hyyppä, H. 2011. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 22, No. 3, 2011. 128–149.
- Holopainen, M., Hyyppä, J. ja Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. *Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja* 5: 1–75.
- Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Heikkilä, J., Huitu, H., Laamanen, R. ja Alho, P. 2015. Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa. *Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja* 7: 1–152.
- Hyppänen, H. 1999. Eriaikaiset ilmakuvat metsäkuvioiden muutosten tunnistamisessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/1999: 155–166.
- Hyppänen, H., Pasanen, K. ja Saramäki, J. 1996. Päätehakkuiden kuviorajojen päivitystarkkuus. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1996(4): 321–335.
- Hänninen, H. 2020. <https://www.slideshare.net/LukeFinland/metsnomistaja-2020-tutkija-harri-hnninen>. [Viitattu 14.4.2020].
- Juujärvi, A. 2016. <https://www.metsakeskus.fi/blogi/anssi-juujarvi-metsavaratietoa-mutta-minkalaista?language=en>. [Viitattu 16.4.2020].

Kangas, A., Haara, A., Holopainen, M., Luoma, V., Packalen, P., Packalen, T., Ruotsalainen, R. ja Saarinen, N. 2019. Kaukokartoitukseen perustuvan metsävaratiedon hyötyanalyysi: MetKu-hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 6/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 32 s.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Communicationes instituti forestalis fenniae 108. Helsinki. 74 s.

Leivo, J., Partanen, J., Hytönen, H., Haataja, L. ja Sorjonen, J. 2020. Maastotarkastusohje. Suomen metsäkeskus.

Luonnonvarakeskus 2019. Suomen metsävarat -tilasto. Saatavissa: [https://stat.luke.fi/sites/default/files/metsavarat\\_2019.pdf](https://stat.luke.fi/sites/default/files/metsavarat_2019.pdf). [Viitattu 31.3.2020].

Maanmittauslaitos 2020. <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/ilmakuva>. [Viitattu 30.3.2020].

Melkas, T. ja Riekk, K. 2020. Automaattisten hakkuukonekuvioiden vertailu referenssikuvioihin. Metsätehon tulostalkvosarja 1/2020. Metsäteho Oy.

Melkas, T., Riekk, K. ja Sorsa, J.-A. 2018. Automaattinen toimenpidekuvion rajojen muodostus hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. Metsätehon tulostalkvosarja 7a/2018. Metsäteho Oy.

Melkas, T., Riekk, K. & Sorsa, J.-A. 2020. Automated Method for Delineating Harvested Stands Based on Harvester Location Data. MDPI. Remote Sensing. 45 s.

Metsäkeskus 2016. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/metsatiedon-keruu>. [Viitattu 30.11.2020].

Metsäkeskus 2019. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/uutiset/metsavaratiedon-inventointimenetelma-uudistuu-ensi-vuonna>. [Viitattu 13.4.2020].

Metsäkeskus 2021. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/hakkuuaikomukset>. [Viitattu 12.2.2021].

Metsäteho 2003. Korjuujälki harvennushakkuussa -opas. Helsinki.

Metsätehon opas 1990. Harvennushakkuiden korjuujäljelle asetettavat vaatimukset sekä korjuujäljen arviointi ja mittaaminen. Tuokinprint Ky. Helsinki.

Mustonen, J., Packalén, P. & Kangas, A. 2008. Automatic segmentation of forest stands using a canopy height model and aerial photography. Scandinavian Journal of Forest Research Vol. 23 Issue 6, p. 534–545. 12 s.

Niemi, M., Mäkinen, A., Viitala, R. ja Lumperoinen, M. 2020. Metsäsuunnittelun laskennan perusteet – arvoja yhteensovittamassa. Tapio Oy. Keuruu. 102 s.

Niskanen, Y. 2005. Metsäsuunnitelman vaikutus metsänkäyttöpäätökseen. Metsätieteellinen tiedekunta. Joensuun yliopisto. Dissertationes Forestales 10. 46 s.

Ottaviani Aalmo, G., Kerstens, P., Belbo, H., Bogetoft, P., Talbot, B. & Strange, N. 2020. Efficiency drivers in harvesting operations in mixed Boreal stands: a Norwegian case study. *International Journal of Forest Engineering*. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1778980>. 13 s.

Ovaskainen, H. (toim.) 2019. Kohti automaattista puunkorjuun laadun mittaamista. *Metsätehon raportti 251*. Metsäteho Oy. ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu).

Poso, S. 1983. Kuvioittaisen arviointimenetelmän perusteita. *Silva Fennica*, vol. 17, n:o 4: 313–349.

Poso, S. 1994. Metsätalouden suunnittelun perusteet. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 5. Helsinki.

Poutanen, M. 2016. Satelliittipaikannus. *Ursan julkaisuja 152*. Tähtitieteellinen yhdistys Urso<sup>®</sup> ry. AS Pajo Tallinna.

Pukkala, T. 2007. Metsäsuunnittelun menetelmät. Joensuu. 207 s.

Riekk, K., Melkas, T., Ovaskainen, H., Poikela, A. ja Sorsa, J.-A. 2019. Ajourien automaattinen tuottaminen ja ajouratunnusten määrittäminen hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. *Metsätehon tulosalvosarja 4/2019*.

Räsänen, T., Melkas, T., Riekk, K., Sorsa, J.-A., Poikela, A. ja Hämäläinen, J. 2019. Hakkuukoneet metsätiedon tuottajina. *Metsätieteen aikakauskirja 2019-10250*. Tieteen tori: Metsätieto ja sähköiset palvelut. 9. <https://doi.org/10.14214/ma.10250>

Saarinen, N., Ärölä, E., Vastaranta, M. ja Holopainen, M. 2018. *Tapion taskukirja*.

Saukkola, A., Melkas, T., Riekk, K., Sirparanta, S., Peuhkurinen, J., Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2019. Predicting Forest Inventory Attributes Using Airborne Laser Scanning, Aerial Imagery, and Harvester Data. 15 s. *Remote sensing (Basel, Switzerland)*, 2019-04-03, Vol.11 (7), p.797. doi:10.3390/rs11070797.

Sell, R. 2002. Segmentointimenetelmien käyttökelpoisuus ennakkokuvioinnissa. *Metsätieteen aikakauskirja 3/2002*: 499–507.

Skogforsk 2020. StanForD/StanForD 2010-Standard for Forest Machine Data and Communication. Skogforsk, Sweden 2020. <https://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/> [Viitattu 16.12.2020].

SMK 2019. Suomen metsäkeskus. Saatavissa: [https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/tiedote-liite-korjuujalki-tarkastukset\\_0.pdf](https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/tiedote-liite-korjuujalki-tarkastukset_0.pdf) [Viitattu 22.9.2020].

SMK 2020. Suomen metsäkeskus. Saatavissa: <https://www.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=a72547104f4741e89ea1a06c172cd089> [Viitattu 22.10.2020].

Tuominen, S. ja Pekkarinen, A. 2007. Kuvioraja-aineiston virheiden korjaaminen numeeristen ortoilmakuvien ja automaattisen segmentoinnin avulla. *Metsätieteen aikakauskirja 2/2007*: 87–100.

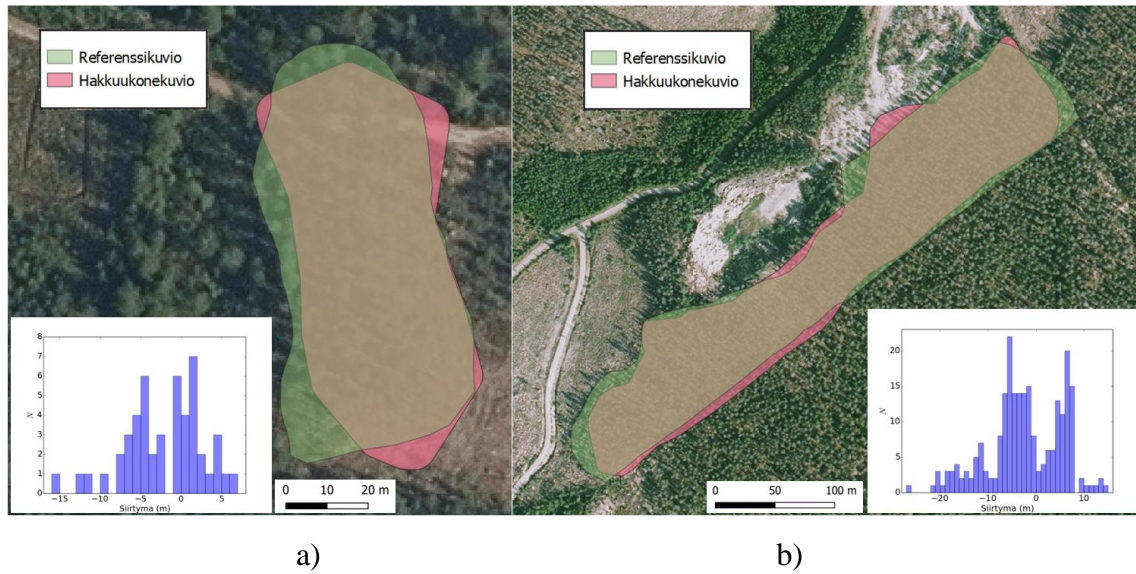
Weiqiang, Z. & Hong, Y. 2012. Alpha shape and Delaunay triangulation in studies of protein-related interactions. *Briefings in Bioinformatics*, Volume 15, Issue 1, January 2014, Pages 54–64, <https://doi.org/10.1093/bib/bbs077>

Ympäristöministeriö 1992. Maisemanhoito. Maisema-alue työryhmän mietintö I. Mietintö 66/1992. Ympäristöministeriö. 203 s.

Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. ja Väisänen, P. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja. 181 s.

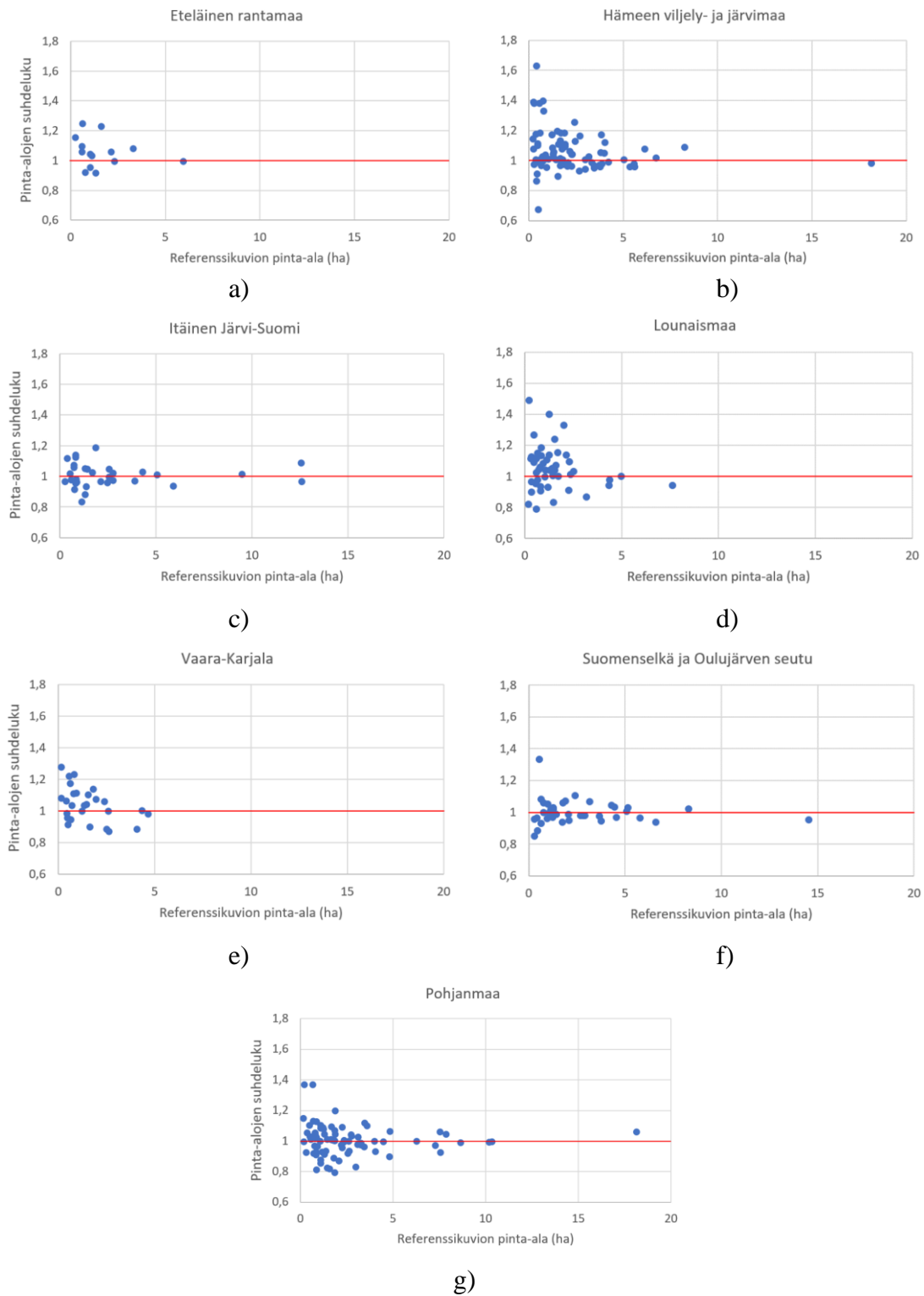
# LIITTEET

## Liite 1:



Kuva 52. **a)** Kaksihuippuinen histogrammi voi tarkoittaa, että kuvio on siirtynyt kokonaisuutena johonkin suuntaan. Tämä kuvio on siirtynyt kaakkoon. **b)** Kaksihuippuisesta histogrammista huolimatta hakkuukonekuvion sijainti on keskimäärin kohdallaan. Alueet, joissa hakkuukonekuvio on referenssikuvion ulkopuolella, ovat jakautuneet pitkin kuvion reunoja.

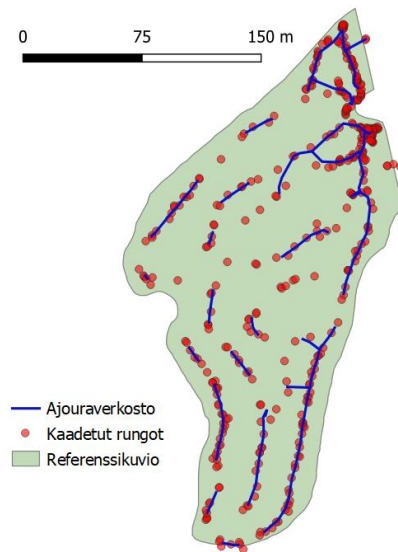
## Liite 2:



Kuva 53. Hakkuukonekuvioiden pinta-alojen suhdeluvut maisemamaakunnittain. Kuvaajat ovat samassa mittakaavassa. Lounaismaalla on yksi isompi, 30,9 hehtaarin kuvio, joka on kuvaajista rajattu pois alueiden parempaa visuaalista vertailua varten. Kuvion pinta-alojen suhdeluku on 1,026.

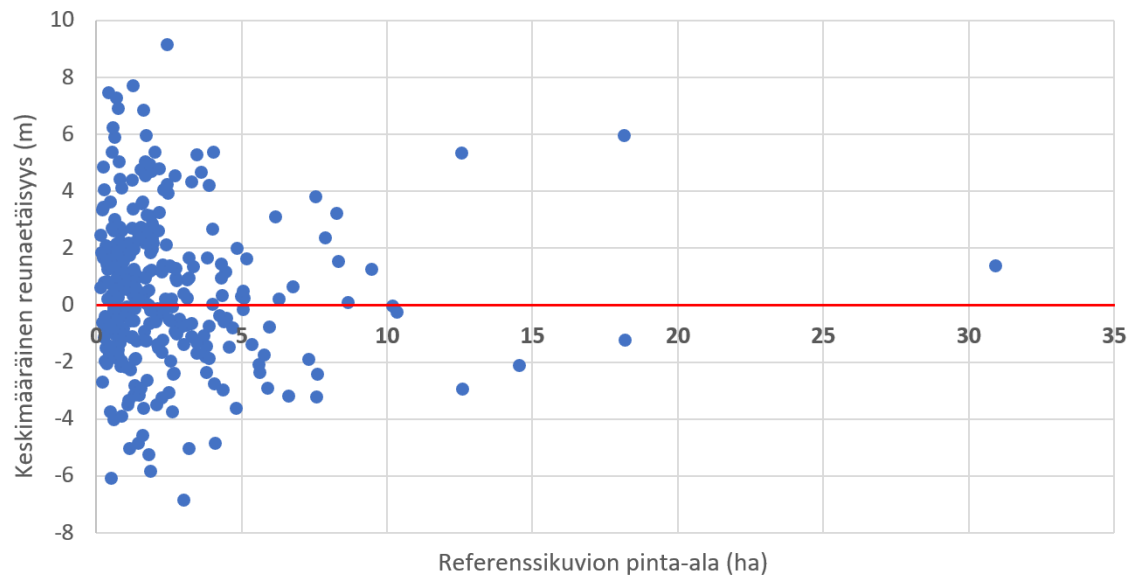


### Liite 3:



Kuva 54. Ylispuiden poisto, josta on kaadettuja runkoja tasaisesti, mutta ajouraverkosto on harva. Kuvion uratiheys on 328 m/ha ja keskimääräinen uraväli 22,1 metriä.

### Liite 4:



Kuva 55. Hakuukonekuvion reunan keskimääräinen etäisyys referenssikuvion reunasta. Varsinkin alle 5 hehtaarin kuvioilla hajonta on samansuuruista kuvion pinta-alasta riippumatta.